

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET

Diplomski studij geološkog inženjerstva

KARTA SPECIFIČNE RANJIVOSTI NA GLAVNE IZVORE DUŠIKOVIH  
SPOJEVA NA PODRUČJU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

Diplomski rad

LAURA HULJEK

GI-286

Zagreb, 2018.

*Prvenstveno, želim zahvaliti mentoru dr. sc. Dariju Perkoviću, docentu RGNF-a, na strpljenju i utrošenom vremenu tijekom izrade praktičnog dijela diplomskog rada, kao i na savjetima u pismenoj verziji rada.*

*Nadalje, želim zahvaliti dr. sc. Zoranu Kovaču, poslijedoktorandu RGNF-a, na ideji za diplomski rad, susretljivosti, savjetima i pomoći pri izradi teorijskog dijela diplomskog rada, te konstruktivnim sugestijama.*

*Zahvaljujem članovima komisije, dr. sc. Jeleni Parlov, profesorici RGNF-a, i dr. sc. Ružičiću, docentu RGNF-a, na sugestijama i savjetima.*

*Zahvaljujem svojoj obitelji: majci Ljiljani, ocu Zdenku, sestri Jeleni i bratu Petru na podršci tijekom studija i na njihovom strpljenju.*

*Zahvaljujem svojim prijateljima na podršci.*

*Na kraju, zahvaljujem svom Dinu, na velikoj podršci tijekom studija, savjetima i strpljenju tijekom izrade diplomskog rada te na brojnim satima provedenim u zajedničkom učenju.*

KARTA SPECIFIČNE RANJIVOSTI NA GLAVNE IZVORE DUŠIKOVIH SPOJEVA  
NA PODRUČJU ZAGREBAČKOG VODONOSNIKA

LAURA HULJEK

Diplomski rad izrađen:

Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

SAŽETAK

Cilj istraživanja ovog rada je procjena ranjivosti zagrebačkog vodonosnika. Prethodno su utvrđena brojna onečišćivala na promatranom području, koja prijete kvaliteti podzemne vode. Od svih onečišćivala, najviše je dostupnih podataka za dušikove spojeve, kao potencijalna onečišćivala. S obzirom na prethodna istraživanja i dostupnost podataka, u obzir su uzeta svojstva vodonosnika, ali i najčešći izvori dušikovih spojeva. S tim je podacima napravljena baza podataka u računalnom softveru ArcGIS Desktop. Podaci su podijeljeni u 9 slojeva, a svakom od 9 slojeva u bazi podataka dodijeljen je jedan težinski faktor ili raspon faktora. Preko težinskog faktora i osmišljene formule dobivene su karte raspodjele indeksa ranjivosti i karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnika.

Ključne riječi: ranjivost, podzemna voda, GIS, dušikovi spojevi, karta

Diplomski rad sadrži: 50 stranica, 20 slika, 2 tablice, 10 priloga i 52 reference

Jezik izvornika: hrvatski

Diplomski rad pohranjen: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta  
Pierottijeva 6, Zagreb

Voditelj: Doc. dr. sc. Dario Perković

Pomoć pri izradi: Dr. sc. Zoran Kovač, poslijedoktorand

Ocjenjivači: Doc. dr. sc. Dario Perković

Izv. prof. dr. sc. Jelena Parlov

Doc. dr. sc. Stanko Ružičić

Datum obrane: 14.12.2018.

MAP OF SPECIFIC VULNERABILITY TO THE MAIN SOURCES OF NITROGEN  
COMPOUNDS IN THE AREA OF ZAGREB AQUIFER

LAURA HULJEK

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Geology and Geological Engineering  
Pierottijeva 6, 10000 Zagreb

ABSTRACT

The subject of this research is the evaluation of vulnerability of the Zagreb aquifer. Previously, all the most frequent contaminants were determined at the observed area. However, the majority of data on potential contaminants refers to nitrogen compounds. Based on the previous knowledge and the availability of the data, the GIS database was created using the ArcGIS Desktop computer software. The collected data had all the previously known information about aquifer properties and sources of nitrogen compounds. The data were divided into 9 layers, and each layer was given one or a range of weighted factors. Based on the weighted factors and the created formula, the map of the vulnerability index distribution and the map of Zagreb aquifer vulnerability were created.

Keywords: specific vulnerability, groundwater, GIS, nitrogen compounds, map

Thesis contains: 50 pages, 20 figures, 2 tables, 10 attachments and 52 references

Original in: Croatian

Thesis deposited at: The Library of Faculty of Mining, Geology, and Petroleum Engineering,  
Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Assistant Professor Dario Perković, PhD

Technical support and assistance: Post-doctoral fellow Zoran Kovač, PhD

Reviewers: Assistant Professor Dario Perković, PhD

Associate Professor Jelena Parlov, PhD

Assistant Professor Stanko Ružičić, PhD

Date of defence: December 14, 2018

## SADRŽAJ

1. Uvod.....	1
2. Područje istraživanja .....	2
2.1. Geografske značajke.....	2
2.2. Geološke značajke .....	3
2.3. Hidrološke i hidrogeološke značajke.....	4
2.4. Pedološke značajke.....	5
3. Metodologija određivanja specifične ranjivosti .....	7
3.1. Granice vodonosnika .....	9
3.2. Hidraulička vodljivost .....	10
3.3. Karta tla .....	11
3.4. Karta debljine nesaturirane zone .....	13
3.5. Temperatura podzemne vode.....	16
3.6. Otopljeni kisik .....	20
3.7. Utjecaj pokrova vodonosnika (poljoprivreda) .....	23
3.8. Industrija.....	25
3.9. Kanalizacija i septičke jame .....	27
3.10. Farme .....	29
3.11. Formula za proračun indeksa ranjivosti .....	30
4. Rezultati i diskusija .....	35
4.1. Pregled dobivenih slojeva.....	35
4.2. Karta specifične ranjivosti .....	37
5. Zaključak.....	44
6. Literatura .....	46

## POPIS SLIKA

Slika 2.1. Geografski položaj zagrebačkog vodonosnika.....	2
Slika 2.2. Shematski prikaz poprečnog presjeka zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006).....	4
Slika 3.1. Prikaz dodatne površine (buffer zone) neposredno uz zapadne, jugozapadne i južne granice vodonosnika, na kojima objekti utječu na stanje u vodonosniku .....	10
Slika 3.2. Prikaz raspodjele veličina hidrauličke vodljivosti na području zagrebačkog vodonosnog sustava.....	11
Slika 3.3. Prikaz raspodjele tala na području zagrebačkog vodonosnog sustava s engleskim nazivima tala i hrvatskim inačicama u Tablici 3.1. ....	13
Slika 3.4. Prikaz nefiltriranih podataka o debljinama nesaturirane zone dobivenih c) metodom, s vrijednostima do 103,44 m .....	15
Slika 3.5. Karta debljine nesaturirane zone na području zagrebačkog vodonosnog sustava izraženih u metrima .....	16
Slika 3.6. Raspodjela temperatura u zagrebačkom vodonosniku, dobivene Ordinary metodom, a izražene u stupnjevima °C .....	19
Slika 3.7. Raspodjela temperatura u zagrebačkom vodonosniku, dobivena Simple metodom, a izražena u stupnjevima °C .....	20
Slika 3.8. Prikaz raspodjele koncentracija otopljenog kisika u zagrebačkom vodonosniku, izraženih u mg/l. Karta jasno prikazuje generalni trend produbljivanja prema istoku, a dobivena je Ordinary metodom. ....	22
Slika 3.9. Karta raspodjele vrijednosti otopljenog kisika u zagrebačkom vodonosniku dobivena Simple metodom .....	23
Slika 3.10. Prikaz pokrova zagrebačkog vodonosnika s podjelom po kategorijama koje su objašnjene u prethodnom tekstu .....	25
Slika 3.11. Prikaz korištene buffer zone za određivanje površine utjecaja industrije i farmi .....	26
Slika 3.12. Prikaz industrijskih objekata i njihovih zona utjecaja na zagrebački vodonosni sustav .....	27
Slika 3.13. Prikaz površine zagrebačkog vodonosnika s razvijenom kanalizacijskom mrežom i površine zagrebačkog vodonosnika sa septičkim jamama. ....	28
Slika 3.14. Prikaz svih farmi na području zagrebačkog vodonosnika i njihovih zona utjecaja .....	30

Slika 3.15. Prikaz pripremljenih rasterskih slojeva za daljnju obradu za dobivanje završne karte .....	33
Slika 3.16. Prikaz pripremljenih rasterskih slojeva za daljnju obradu za dobivanje završne karte. ....	34
Slika 4.1. Karta raspodjele indeksa ranjivosti dobivena iteracijom XV .....	39
Slika 4.2. Karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava obzirom na dušikove spojeve podijeljena u pet kategorija.....	42

## POPIS TABLICA

Tablica 3.1. Pedološke skupine na području zagrebačkog vodonosnika (modificirano prema Ružičić, 2013; podaci o karakteristikama preuzeti iz Lončarić et al., 2014) .....	12
Tablica 3.2. Prikaz težinskih faktora svi čimbenika koji su uzeti u obzir tijekom izrade završne karte ranjivosti.....	31

## POPIS PRILOGA

Prilog 1. Prikaz svih iteracija napravljenih kako bi se odredila najbolja završna karta za područje zagrebačkog vodonosnog sustava (crvenom bojom označeni su težinski faktori koji su mijenjani)
Prilog 2. Prikaz karata indeksa ranjivosti s obzirom na iteracije I i II
Prilog 3. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama III i IV
Prilog 4. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama V i VI
Prilog 5. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama VII i VIII
Prilog 6. Prikaz karata indeksa ranjivosti obzirom na iteracije IX i X
Prilog 7. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama XI i XIV
Prilog 8. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama XII i XIII
Prilog 9. Prikaz raspodjele indeksa ranjivosti prema iteraciji XV i karta koja je uzeta za daljnju obradu
Prilog 10. Karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava s obzirom na dušikove spojeve

## 1. UVOD

Područje zagrebačkog vodonosnika uvršteno je u strateške zalihe podzemne vode Republike Hrvatske te je zbog toga poznavanje ovog područja od izuzetne važnosti. Na istraživanom području obavljena su brojna istraživanja te se ona i dalje nastavljaju. Nakić et al. (2013) u svojem su konceptualnom modelu naveli brojne onečišćivače koji utječu na vodonosni sustav. Od onečišćivača su navedeni: potencijalno toksični metali, nitrati (dušikovi spojevi), pesticidi, klorinirani alifatski ugljikovodici, radionuklidi, soli i organski onečišćivači iz otpadnih voda.

S obzirom na detaljnost istraživanja, definitivno se ističu nitrati kao dušikovi spojevi, te zbog njih o dušikovim spojevima na području zagrebačkog vodonosnog sustava ima velik broj podataka. Razlog brojnim istraživanjima ovih spojeva jesu njihova svojstva, odnosno postojanost u podzemnim vodama. Dušik je nutrijent za biljke i one ga dobivaju kroz njegove spojeve. Međutim, njegove povećane količine u okolišu uzrokuju brojne probleme. Izaziva eutrofikaciju u površinskim vodenim sustavima, čime uništava životinjski svijet zbog prekomjernog rasta bilja, dok kod ljudi izaziva bolesti poput methemoglobinemije, a prema nekim istraživanjima je povezan i s karcinomima gastrointestinalnog sustava (Balderacchi et al., 2012).

Iz gore navedenih razloga, a s ciljem boljeg razumijevanja opasnosti od dušikovitih spojeva na području zagrebačkog vodonosnog sustava, pokrenuto je ovo istraživanje. Cilj istraživanja je izrada karte ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava s obzirom na izvore dušikovitih spojeva, koristeći alate u računalnom softveru *ArcGIS Desktop* (ESRI, 2018b), te ocijeniti potrebu za dodatnim alatima, poput ekstenzije *Geostatistical Analyst*.

Za izradu završne karte, osmišljena je formula, koja odgovara slojevima koji su uzeti u obzir, kao značajnim parametrima za širenje i onečišćenje dušikovim spojevima. Kartom se pokušava prikazati ranjivost vodonosnog sustava podijeljena u pet kategorija: vrlo visoka ranjivost, visoka ranjivost, umjerena ranjivost, niska ranjivost i vrlo niska ranjivost. S obzirom na različite ulazne podatke (točkasti, poligonski, rasterski) bilo je potrebno sve krajnje slojeve pomoću određenih alata u *ArcMap-u* (glavnom modulu GIS paketa) svesti na isti oblik, kako bi se mogli dalje koristiti za izradu završne karte.

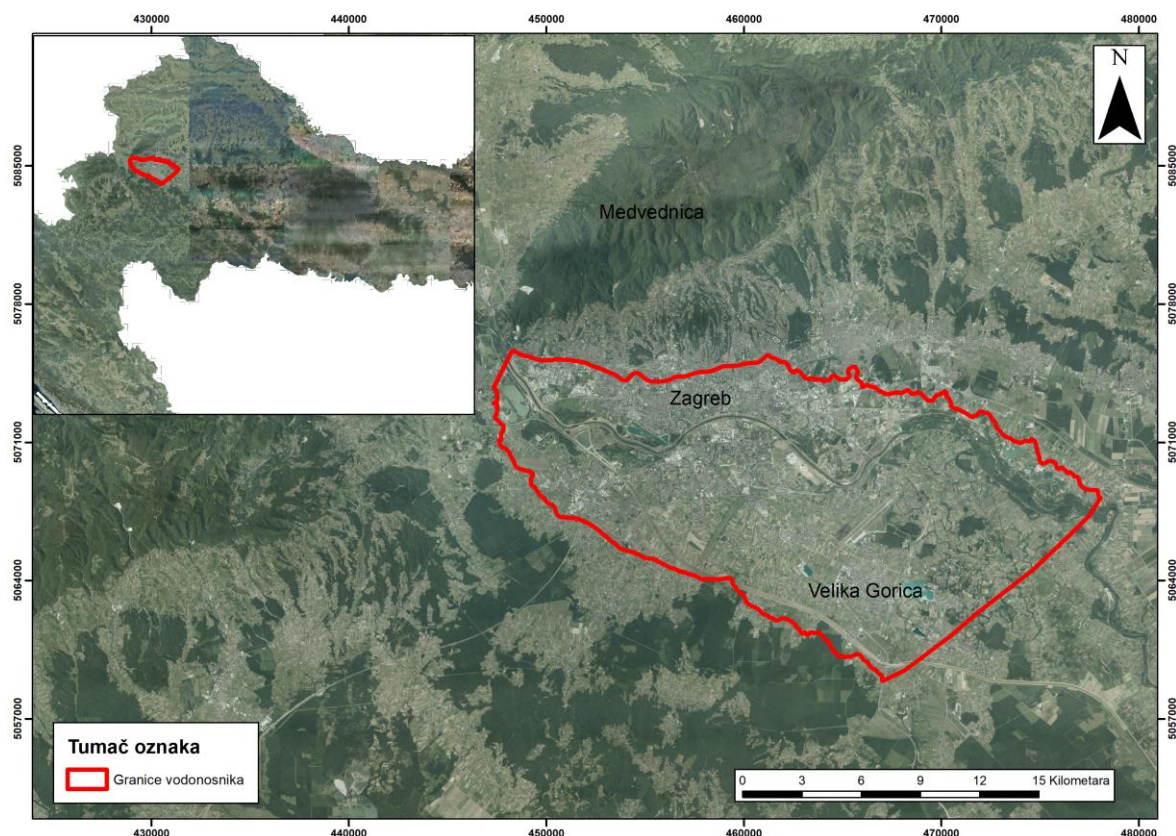


## 2. PODRUČJE ISTRAŽIVANJA

### 2.1. GEOGRAFSKE ZNAČAJKE

Geografski, zagrebački se vodonosnik smjestio u sjeverozapadnom dijelu Republike Hrvatske. Veličina samog vodonosnika je otprilike 350 km<sup>2</sup>. Vodonosnik se pruža duž toka rijeke Save s kojom je u hidrauličkoj vezi (Nakić et al., 2013).

Zagrebački vodonosnik je na sjeveru ograničen gorom Medvednicom (Slika 2.1). Medvednica predstavlja nepropusnu barijeru, a površinski tokovi koji se formiraju na njenim padinama prihranjuju Savu. Na jugu se nalaze Vukomeričke gorice kroz koje se odvija dotjecanje. Na zapadu je vodonosnik ograničen Samoborskim gorjem. Sjeverozapadno, događa se prihranjivanje vodonosnika na području Podsusedskog praga koji razdvaja samoborski i zagrebački vodonosnik, dok se na jugoistoku proteže do Rugvice (Nakić et al, 2013; Bačani & Posavec, 2014).



Slika 2.1. Geografski položaj zagrebačkog vodonosnika

## 2.2. GEOLOŠKE ZNAČAJKE

Zagrebački vodonosni sustav izgrađen je uglavnom od pijesaka, šljunaka i prahova odnosno prahovitih glina, koje su ponajviše taložene tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena i holocena. Zagrebački se vodonosni sustav sastoji od dva vodonosna sloja. Dublji vodonosni sloj čine jezersko-barske naslage, a plići je izgrađen od aluvijalnih naslaga taloženih rijekom Savom (Velić & Saftić, 1991, Velić & Durn 1993, Kireta, 2014).

U srednjem i gornjem pleistocenu formiraju se brojne močvare i jezera, čemu je uzrok povećanje vlažnosti klime. Ovakve se hidrološke forme stvaraju u dolinskim dijelovima, dok s okolnih brda (Medvednica, Marijagorička brda i Žumberačko gorje) bujični tokovi donose klastični materijal u doline (Velić & Saftić, 1991). Ove naslage, formirane tijekom srednjeg i gornjeg pleistocena, danas čine dublji vodonosni sloj.

Plići je sloj taložen tijekom holocena. Početkom holocena formira se rijeka Sava čime započinje transport materijala s Alpskog područja (Velić & Durn, 1993). Karakteristično je da je Sava nosila veće količine materijala tijekom vlažnih i toplih razdoblja, dok je transport tijekom sušnog perioda bio značajno slabiji. Ovakve pojave razlog su izrazite heterogenosti i anizotropije vodonosnika (Velić et al., 1999; Poropat, 2016).

U holocenske naslage spadaju aluvijalne naslage. Na području zagrebačkog vodonosnika, raspoznaju se ukupno tri aluvijalne terase, pri čemu je najstarija terasa taložena u pleistocenu (a3). Riječna terasa a3 izgrađena je od slabovezanog krupnozrnog konglomerata. Riječna terasa a2 je razvijena duž cijelog toka Save, uz manje prekide, a sastoji se od izmjene krupnozrnih šljunaka i pijesaka, a taložena je tijekom holocena. Riječna terasa a1 je najmlađa terasa. Riječna terasa a1 je razvijena duž cijelog toka rijeke Save, a obilježava razdoblje erozije i denudacije, zbog čega se na velikoj površini terase vide stara korita rijeke Save. Recentni aluvijalni nanosi rijeke Save (a) predstavljaju područje neposredno uz rijeku Savu, koje ona i danas plavi tijekom visokih voda (Šikić et al., 1972).

Na sjeveru se aluvijalne naslage naslanjaju na proluvijalne naslage, većinom glinovitog sastava. Na zapadnom rubu, zagrebački je vodonosnik u izravnoj vezi sa samoborskim preko Podsusedskog praga. Na istočnom rubu zagrebačkog vodonosnika odvija se otjecanje. Na južnom rubu zagrebačkog vodonosnika nailazi se na klastične sedimente Stupničke terase koji prelaze u gornjopaludinske slojeve sjevernih padina Vukomeričkih gorica (Šikić et al, 1972, Basch, 1980, Feigl, 2016).

Pokrovni sloj vodonosnog sustava većinom izostaje ili je debljine nekoliko metara. Prema istoku njegova debljina raste i do petnaestak metara (Bačani et al., 2005, Feigl, 2016), dok su Ružičić et al. (2012) potvrdili da je većinom do 8 m debljine.

### 2.3. HIDROLOŠKE I HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE

Zagrebački vodonosnik je otvoreni vodonosnik, kojemu gornju granicu predstavlja vodno lice pod atmosferskim tlakom. Što se tiče samih granica vodonosnika: granica dotjecanja je na zapadu, na sjeveru je nepropusna granica, na istoku se odvija otjecanje (Nakić et al., 2013), dok je Posavec (2006) utvrdio da se na južnoj granici odvija dotjecanje, odnosno prihranjivanje vodonosnika, što je bilo u suprotnosti s dotadašnjim saznanjima.

Vodonosni sustav nastao je meandriranjem Save, preko koje se danas odvija i prihranjivanje. Vodonosnik se dodatno prihranjuje infiltracijom oborine, infiltracijom iz propusne vodoopskrbne i kanalizacijske mreže, dotjecanjem po zapadnoj granici iz susjednog samoborskog vodonosnika; te dotjecanjem po južnoj granici vodonosnika s područja Vukomeričkih gorica (Posavec & Bačani, 2009). Prema Posavec (2006), infiltracija, odnosno prihranjivanje vodonosnika vodom iz Save odvija se za vrijeme visokih voda, dok se pri niskim vodama na pojedinim dionicama odvija dreniranje vodonosnika.

Na shematskom prikazu je vidljivo da se zagrebački vodonosnik sastoji od dva sloja (Slika 2.2). Vodonosni sustav doseže ukupnu debljinu od 100 m na području Črnkovca (Velić & Saftić, 1991, Velić & Durn, 1993).



*Slika 2.2. Shematski prikaz poprečnog presjeka zagrebačkog vodonosnog sustava (Posavec, 2006)*

Zbog svoje litološke građe (prevladavaju većinom šljunci i krupnozrnati pijesci), hidrauličke vodljivosti su velike i u zapadnim dijelovima vodonosnika dosežu vrijednosti od 3.000 m/dan. Prema istoku vrijednosti hidrauličke vodljivosti opadaju, pa kod Črakovca iznose 2.000 m/dan, dok još istočnije padaju i na 1.000 m/dan (Urumović & Mihelčić, 2000). Što se tiče transmisivnosti, najveće vrijednosti dosežu se na području Črakovca – čak 50.000 m<sup>2</sup>/dan. Razlozi ovako velikih vrijednosti transmisivnosti su velika debljina vodonosnog sustava i velike vrijednosti hidrauličke vodljivosti (Brkić & Biondić, 2000). Zagrebački vodonosnik predstavlja strateški izvor vode za Republiku Hrvatsku jer opskrbljuje pitkom vodom gotovo milijun stanovnika (NN 91/2008).

#### **2.4. PEDOLOŠKE ZNAČAJKE**

Pedološke karakteristike područja zagrebačkog vodonosnika određene su na temelju „Pedološke karte Republike Hrvatske mjerila 1:300.000“ (Bogunović et al., 1996). Na istraživanom području se susreće šest jedinica tala: eutrično smeđe tlo na holocenskim nanosima, aluvijalno neoglejeno i aluvijalno oglejeno tlo, pseudoglej na zaravni, aluvijalno oglejeno, močvarno glejno i močvarno glejno vertično tlo. Prema Ružičić (2013) glavne pedološke jedinice na području zagrebačkog vodonosnika su aluvijalno tlo, močvarno glejno tlo i eutrično smeđe tlo na holocenskim nanosima koje zajedno prekrivaju preko 70 % površine zagrebačkog vodonosnika.

Aluvijalno tlo je hidromorfno tlo nastalo prekomjernim vlaženjem uzrokovanim poplavama bez stagniranja vode. Ovakva tla nastaju uz vodotoke i rijeke, a za područje Zagreba je karakteristično da već dugi niz godina nisu plavljena, već se svrstavaju u aluvijalna zbog svoje nerazvijenosti (Ružičić, 2013).

Eutrično smeđe tlo je automorfno tlo koje pripada kambičnom podtipu tla. Kod automorfnih tala vlaženje se odvija isključivo preko oborina te nema stagniranja vode. Na istraživanom se području razvija na aluvijalnim ilovastim nanosima. Ponegdje dolazi do oglejavanja pod utjecajem podzemne vode. Tekstura varira od praškasto-ilovaste do rjeđe glinasto-ilovaste (Ružičić, 2013). Ova tla su dobre poroznosti i srednjedobrih retencijskih svojstava (Lončarić et al., 2014)

Močvarno glejno tlo je hidromorfno tlo, koje se na području zagrebačkog vodonosnika dominantno razvijalo s podtipom vertično. Močvarno glejno tlo nastaje prilikom vlaženja tla površinskom i/ili podzemnom vodom koja stagnira. Ovo tlo sadrži velike količine glinovitih

čestica (Ružičić, 2013). Prevladavaju reduktivni uvjeti, tekstura je praškasto-ilovasta ili praškasto-glinovito-ilovasta ili glinovito-ilovasta, a propusnost vode je slaba (Lončarić et al., 2014).

Pseudoglejna tla su hidromorfna tla u kojima dolazi do izmjene suhih i vlažnih perioda, a time i reduktivnih odnosno oksidativnih uvjeta. Sadrže horizont na kojemu stagnira voda. Tekstura im je praškasto-glinovito-ilovasta te su vrlo zbijena i nepropusna (Lončarić et al., 2014).

### 3. METODOLOGIJA ODREĐIVANJA SPECIFIČNE RANJIVOSTI

Geografski informacijski sustav (GIS) se već dugi niz godina koristi u upravljanju vodoopskrbom i vodonosnim sustavima u hidrogeologiji. Razlog tomu je što GIS sustav može objediniti veliki broj različitih vrsta podataka koji mogu utjecati na hidrogeološke sustave (Hatzopoulos, 2002). Uz literaturu vezanu uz upotrebu *ArcGIS* softvera i njegovih alata i ekstenzija, pomoć pri izradi bila je i web stranica *ArcGIS Resources* (ESRI, 2018a), koja sadrži odlična objašnjenja svih alata u softveru *ArcGIS Desktop* (ESRI, 2018b).

Jednim od vrlo korisnih dodataka pokazala se ekstenzija *Geostatistical Analyst-a*. Ova ekstenzija omogućuje interpolaciju na temelju nekoliko poznatih metoda interpolacije. U samom *Geostatistical Wizard-u* mogu se naći tri vrste metoda. Za potrebe ovog istraživanja korištena je metoda u skupini *Geostatistical methods*. Ove su metode bazirane na metodi *Kriging-a*. Konkretno je korištena metoda *Kriging/CoKriging*. Kada se odabere željena metoda, *Geostatistical Wizard* dalje nudi niz mogućnosti za precizno definiranje podataka i kasnije rezultata interpolacije. Na ovaj je način moguće upravljati većim brojem podataka, a i preciznijim procesom interpolacije, što ovaj alat čini izuzetno korisnim. Karte dobivene ovim alatom pokazuju veću točnost i preciznost, koja je određena na temelju prethodnih istraživanja i saznanja.

Kako bi se uopće moglo početi s definiranjem ranjivosti vodonosnika, potrebno je definirati pojam ranjivosti. Prema Nakić (2015), ranjivost nije moguće izravno mjeriti, jer je ona relativno, nemjerljivo i bezdimenzionalno svojstvo, koje označava vjerojatnost pojave onečišćenja. S obzirom na to, uzimaju li se u obzir vrsta onečišćujućih tvari ili ne, razlikuje se prirodna i specifična ranjivost vodonosnika. Prirodna ranjivost u obzir uzima samo svojstva područja (geološka, pedološka i hidrološka), dok specifična ranjivost osim značajki sustava uključuje i svojstva onečišćujućih tvari, njihov transport i različite mogućnosti onečišćenja.

Prilikom inicijalnog ispitivanja uzročnika pojave dušikovih spojeva u vodonosniku i općenitih izvora, odnosno uzroka jače ranjivosti vodonosnika na dušikove spojeve, u obzir su uzeti brojni parametri i faktori. Daleko je veći broj antropogenih uzroka uzet u obzir nego prirodnih. Međutim mnogi su i isključeni, zbog nedovoljno dokaza o njihovoj povezanosti, ili manjka podataka.

Jedna od prvih stavki koji su uzete u obzir jest geološka građa. Prema prijašnjim istraživanjima (Kovač et al., 2017a) dobiveno je da je u a2 riječnoj terasi zabilježena veća koncentracija nitrata nego u a1 terasnim sedimentima. Razlog za ovakvo ponašanje ipak nije bilo moguće naći i povezati na temelju dosadašnjih istraživanja zbog čega je ovaj parametar isključen.

Nadalje su u obzir uzete oborine, evapotranspiracija i infiltracija. Iste su isključene zbog samo četiri stanice na kojima se na području zagrebačkog vodonosnog sustava mjere ovi parametri, što znači da i sama interpolacija ne bi bila dovoljno precizna. Razmatran je i utjecaj debljine vodonosnika, međutim, i on je isključen.

Nadalje, razmatran je utjecaj odlagališta otpada i divljih odlagališta (šljunčara) te kolektora za otpadne vode kao zasebnih slojeva. Isti su odbačeni iz sljedećih razloga. Odlagalište otpada i kolektor za otpadne vode nalaze se u istočnom dijelu grada i predstavljaju po jedan točkasti izvor što znači da njihov utjecaj na čitavi vodonosnik i posebno njegov zapadni dio nije značajan. Isto tako, odlagalište otpada je uzeto u obzir u okviru sloja „Pokrov“. Divlja su odlagališta odbačena jer ne postoji nigdje aktualna evidencija divljih odlagališta. Pokušano je evidentirati ih pomoću softvera *Google Earth Pro* (GOOGLE, 2018a) kao i mrežnog WEBGIS servisa *Google Earth Engine (Timelapse)* (GOOGLE, 2018b), ali zbog nedovoljno dobre rezolucije softvera nije ih bilo moguće odrediti.

Razmatrane su i urbane zelene površine, ali su i isključene zbog male površine koju zauzimaju. U obzir su uzete i autoceste i državne ceste, kao i pruge. Uz autoceste i državne ceste provedena istraživanja pokazuju da je dušik u otpadnim vodama porijeklom iz atmosferske depozicije (Herrera Environmental Consulting, Inc., 2007), zbog čega prometnice nisu uzete u obzir, jer takve količine nisu značajne.

Razmatran je i nagib terena, međutim, zbog vrlo malih razlika u nadmorskim visinama na samom području zagrebačkog vodonosnika, niti on nije uzet u obzir. Isto tako, razmatrane su i koncentracije nitrata i promjena koncentracija u vodonosniku, mjerene u piezometrima, ali je zaključeno da je bilo kakvo povišenje koncentracija dušikovih spojeva u vodonosnom sloju posljedica svih navedenih utjecaja, i da same ne utječu na ranjivost vodonosnika. U nastavku su navedeni parametri koji su uzeti u obzir te su detaljnije razrađeni.

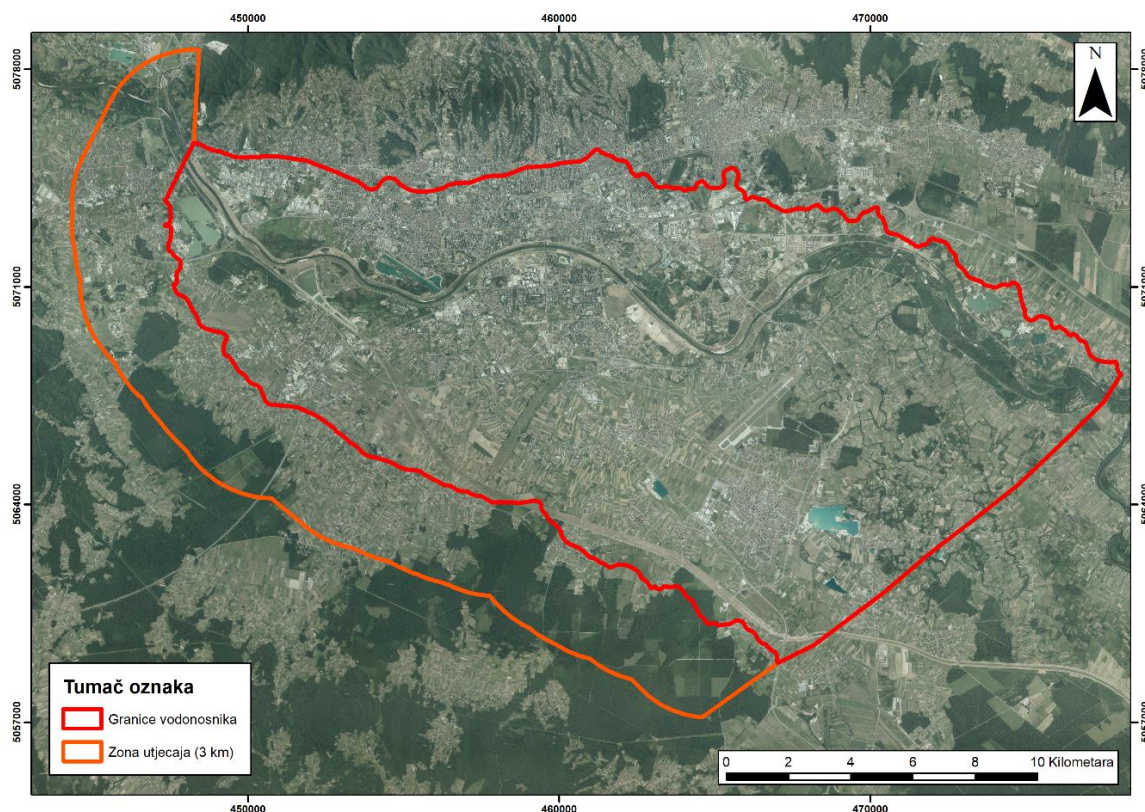
### 3.1. GRANICE VODONOSNIKA

Granica vodonosnika korištena u ovom istraživanju napravljena je prema podacima dobivenim u okviru istraživanja provedenih tijekom izrade Osnovne geološke karte Republike Hrvatske, listova Zagreb (Šikić et al., 1977) i Ivanić Grad (Basch, 1981). Granica vodonosnog sustava iscrtana je po granici aluvija rijeke Save. Dobiven *shapefile* je poligonska datoteka koja omeđuje zagrebački vodonosnik (Slika 2.1). Kreirana je u službenom koordinatnom sustavu Republike Hrvatske HTRS96/TM, u kojemu je izrađen i čitav GIS sadržaj ovog rada. Podlogu GIS sadržaja rada predstavlja digitalna ortofoto (DOF) karta preuzeta sa stranice Državne geodetske uprave (DGU, 2018).

Poligon obuhvaća područje od Podsusedskog praga na zapadu, dopire do južnih obronaka Medvednice na sjeveru. Dalje se proteže do Rugvice na istoku i na jugu do sjevernih obronaka Vukomeričkih gorica (Bačani & Posavec, 2014).

Za neke kasnije slojeve u GIS bazi podataka, bilo je potrebno uzeti u obzir i objekte koji se nalaze izvan granica vodonosnika. U tu je svrhu napravljen sloj s dodatnom površinom na zapadnoj, jugozapadnoj i južnoj strani vodonosnika širine 3 km, tzv. *buffer* zona vodonosnika. Ova je zona prikazana na Slici 3.1, a uzeta je u obzir prilikom izrade slojeva industrije, kanalizacije i septičkih jama, te farmi.





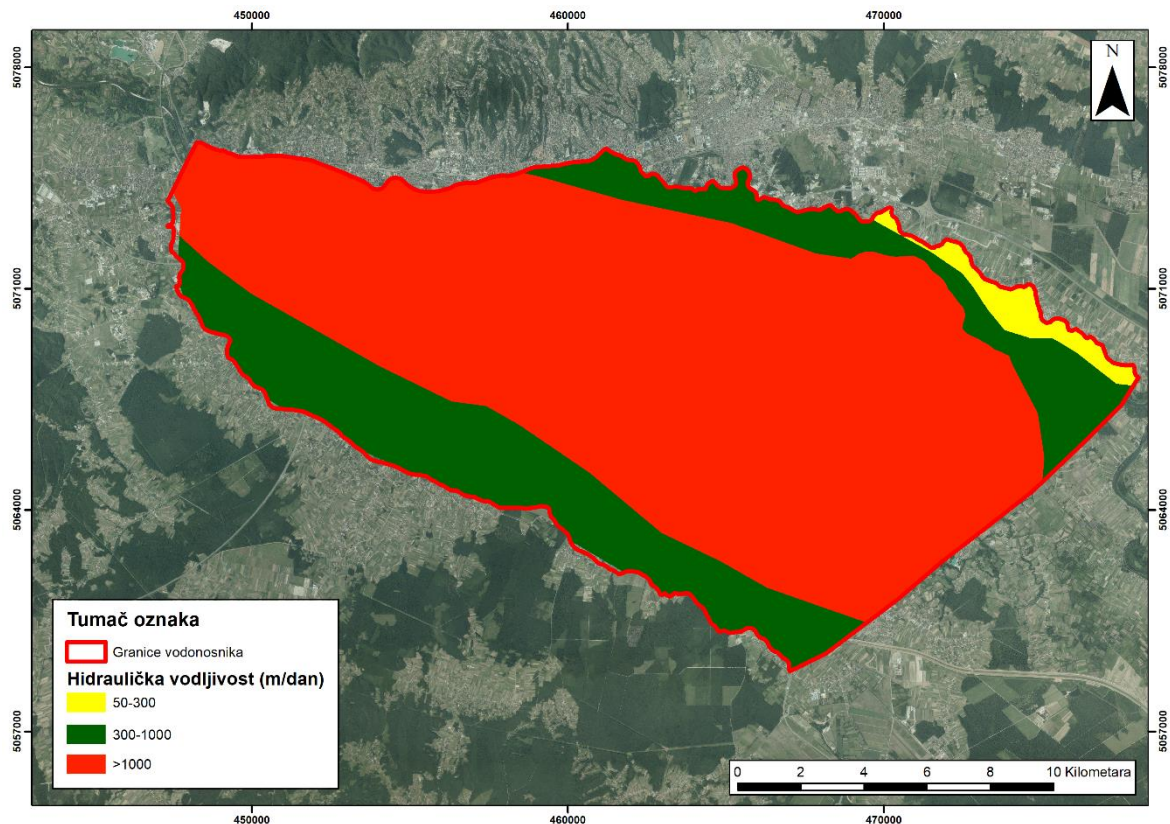
*Slika 3.1. Prikaz dodatne površine (buffer zone) neposredno uz zapadne, jugozapadne i južne granice vodonosnika, na kojima objekti utječu na stanje u vodonosniku*

### **3.2. HIDRAULIČKA VODLJIVOST**

Prema Almasri et al. (2007) hidraulička vodljivost je najznačajnije svojstvo u prostorno heterogenim vodonosnicima. Hidraulička vodljivost određuje transport i tok u vodonosniku zbog čega značajno utječe na ranjivost vodonosnika.

Utjecaj hidrauličke vodljivosti na ranjivost vodonosnika napravljen je na temelju karte hidrauličkih vodljivosti za cijelu Republiku Hrvatsku, izrađene za potrebe izrade dokumenta Vodnogospodarske osnove Republike Hrvatske iz 2002. godine. Prilikom izrade Vodnogospodarske osnove Republike Hrvatske (2002) korišteni su podaci iz Hidrogeološke karte Republike Hrvatske M 1:300.000 (Biondić et al., 1996) i Vodnogospodarske osnove Republike Hrvatske – dio Podzemne vode (Biondić & Brkić, 2001). Pomoću *shapefile-a* koji prikazuje granice zagrebačkog vodonosnika s hidrogeološke karte Republike Hrvatske je izrezan zagrebački vodonosnik s pripadajućim vrijednostima hidrauličke vodljivosti, koje su podijeljene u tri razreda: 50-300 m/dan, 300 – 1.000 m/dan, >1.000 m/dan (Slika 3.2). Može se pretpostaviti, da se kod ovako velikih vrijednosti hidrauličke vodljivosti, tok odvija

dominantno preko advekcije, manje preko disperzije, dok sorpcija izostaje (Domenico & Schwartz, 1997).



*Slika 3.2. Prikaz raspodjele veličina hidrauličke vodljivosti na području zagrebačkog vodonosnog sustava*

### 3.3. KARTA TLA

Prema Ružičić (2013), na istraživanom području postoji šest vrsta tala te vodena tijela i urbana područja. Tla su nabrojena u Tablici 3.1 te su dani njihovi nazivi na engleskom kao i njihove glavne karakteristike bitne za ocjenu ranjivosti.

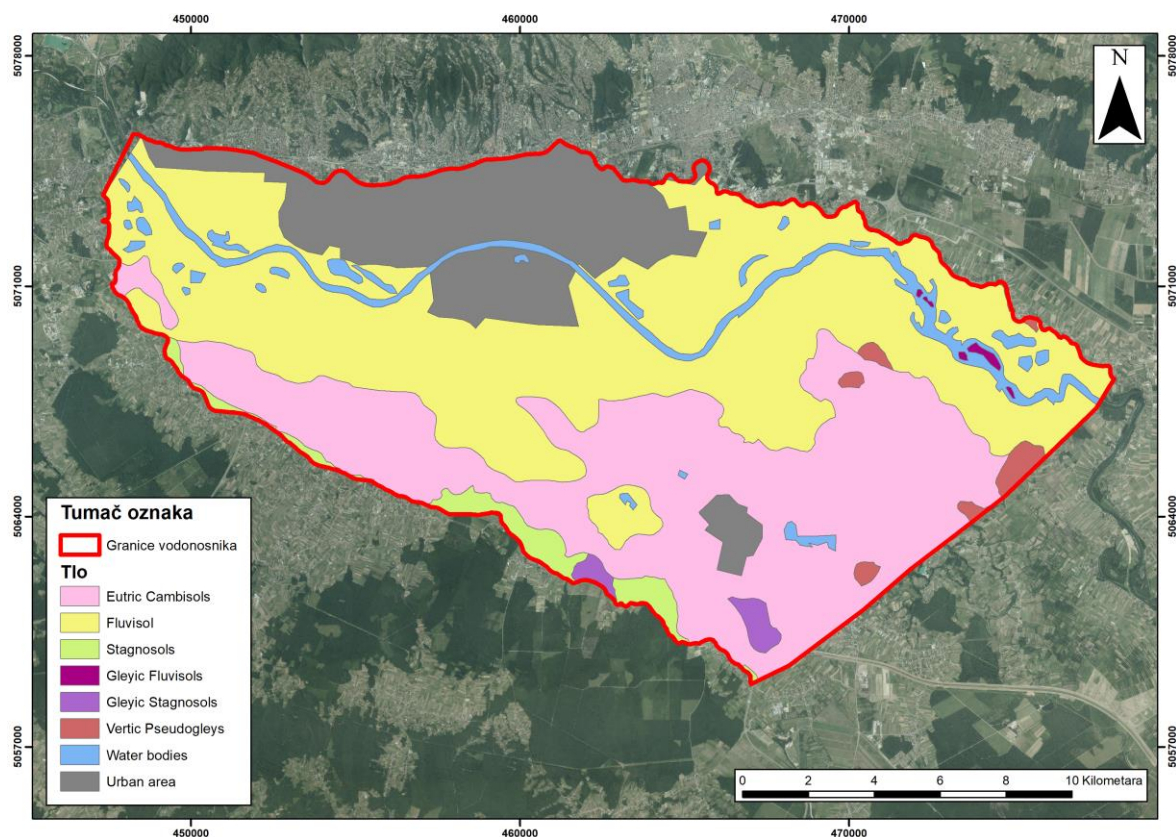
Područje koje je Ružičić (2013) koristio prilagođeno je području zagrebačkog vodonosnika naredbom *Arc Toolbox/Analysis Tools/ Extract/Clip*, a prije toga su svi slojevi spojeni u jedan naredbom: *Data Management Tools/General/Merge*.

Tablica 3.1. Pedološke skupine na području zagrebačkog vodonosnika (modificirano prema Ružičić, 2013; podaci o karakteristikama preuzeti iz Lončarić et al., 2014)

Engleski naziv (FAO, 2006)	Naziv i objašnjenje na hrvatskom jeziku	Glavne karakteristike
Eutric Cambisol	Eutrično smeđe tlo na holocenskim nanosima	Ilovasto do praškasto-glinasto- ilovasta tekstura. Tlo pogodno za poljoprivredu, povoljna pedofizikalna svojstva, osrednjena retencijska svojstva.
Fluvisol	Aluvijalno neoglejeno i aluvijalno oglejeno tlo	Varijabilna tekstura s pijeskom na dnu. Propusna, prozračna i rahla tla.
Gleyic Fluvisols	Aluvijalno oglejeno	
Stagnosols	Pseudoglej na zaravni	Razlikuju se suhi i vlažni periodi u kojima se odvijaju redukcija odnosno oksidacija. Praškasto-glinasto-ilovasta tekstura, vrlo zbijena i gotovo nepropusna.
Gleyic Stagnosols	Močvarno glejno	Praškasto ilovasta tla ili glinasto ilovasta tla. Dominiraju reduktivni uvjeti, ljepljiva i plastična tla, nastaju zbog vlaženja površinskom ili podzemnom vodom.
Vertic Pseudogleys	Močvarno glejno vertično	
Water bodies	Vodena tijela (rijeka, jezera, ribnjaci)	-
Urban area	Veća naselja	-

Na taj je način dobiven jedinstven *shapefile* tala područja zagrebačkog vodonosnika. Na ovom su sloju, u obzir uzete površine pod vodenim tijelima, kao i urbana područja, kako bi se dobila cjelovita karta za cijelu površinu zagrebačkog vodonosnog sustava (Slika 3.3).





Slika 3.3. Prikaz raspodjele tala na području zagrebačkog vodonosnog sustava s engleskim nazivima tala i hrvatskim inačicama u Tablici 3.1.

### 3.4. KARTA DEBLJINE NESATURIRANE ZONE

Nesaturirana zona predstavlja dio tla i stijena od površine tla do vodnog lica ili saturirane zone (Ružičić, 2013). Za izradu karte nesaturirane zone na području zagrebačkog vodonosnog sustava korištene su visoke vode koje su zabilježene 5.11.2012. (na podacima od 1991. – 2015. godine koje je koristio Kovač, 2017). Razlog tomu je što je tada nesaturirana zona bila najtanja, a voda je isprala onečišćujuće tvari iz najvećeg dijela nesaturirane zone.

Da bi se dobila karta debljine nesaturirane zone zagrebačkog vodonosnika, korišten je digitalni model reljefa (engl. *Digital Elevation Model*, DEM). Rezolucija DEM-a je 25 metara. Za prikaz razina podzemne vode korišten je linijski *shapefile* razina podzemne vode. Ovaj *shapefile* je izrezan tako da otprilike odgovara području zagrebačkog vodonosnog sustava (ekvipotencijale na jugoistočnom dijelu vodonosnika prelaze van granica kako bi se dobila potpuna slika). Nakon toga DEM je izrezan kako bi se dobio dio koji odgovara zagrebačkom vodonosniku jer je na taj način lakše upravljati podacima u *ArcMap*-u.

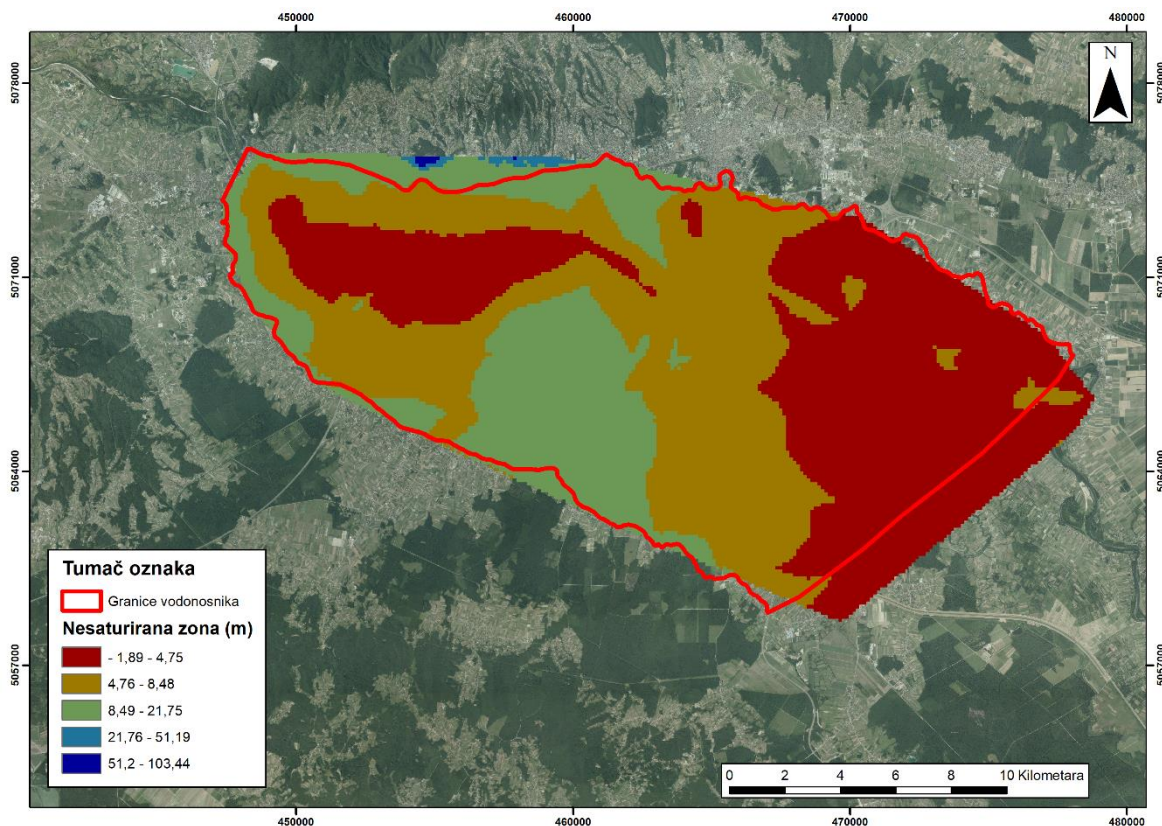
Za izrezivanje DEM-a korištene su četiri metode:

- a) *Data Management/Raster/Raster Processing/Clip*. Ubačeni su traženi podaci, međutim, ova metoda nije dala zadovoljavajuće rezultate, jer je kao podloga za izrezivanje korišten *shapefile* razina podzemne vode pri čemu je i izrezivanje bilo po svakoj liniji *shapefile-a*.
- b) *Spatial Analyst/Extraction/Extract by Mask*. Da bi se mogla koristiti ova metoda prvo je bilo potrebno nacrtati pravokutnik (alatna traka: *Draw*). Nakon toga su ubačeni potrebni podaci za naredbu *Extract by Mask*, međutim ni ova metoda nije bila uspješna.
- c) *Export Data*. Za ovu metodu korišten je pravokutnik nacrtan u prethodnoj metodi. Nakon toga se na DEM-u radilo sljedeće. Desnim klikom miša odabrano je *Export Data*. Određene su potrebne vrijednosti: *Extent/Selected Graphics, Spatial Reference/Raster Data* te je raster spremljen s drugim koordinatnim sustavom (HTRS96/TM). Ova je metoda bila uspješna, te je nakon toga nacrtani pravokutnik bio izbrisan.
- d) Najuspješnijom metodom pokazala se sljedeća: Naredbom *Data Management/Raster/Raster Processing/Clip* je izrezan DEM Hrvatske, ali je kao podloga korišten poligonski *shapefile* koji označava granice vodonosnika. Dobiven je točan oblik vodonosnog sustava.

Za metode c) i d) korištena je dalje ista metoda rada koja se pokazala uspješnom. Napravljena je TIN datoteka (engl. *Triangular irregular networks*, u GIS-u se koriste za prikaz morfologije površine) razina podzemne vode. Vanjske granice GIS sloja razina podzemne vode su ostale veće od granica zagrebačkog vodonosnika jer je zbog rasporeda ekvipotencijala na taj način dobiven najbolji rezultat. TIN datoteka je prebačena u rasterski oblik koji je korišten za daljnje korake. Nakon toga je korištena naredba *3D Analyst Tools/Raster Math/Minus* čime se od DEM-a, rastera s većim vrijednostima nadmorske visine, oduzimao raster manjih vrijednosti nadmorske visine (TIN datoteka prebačena u rasterski oblik). Na taj je način dobivena nesaturirana zona i odgovarajuće debljine nesaturirane zone.

Na nefiltriranim podacima dobivenim metodom c), vidljivo je da se vrijednosti debljina nesaturirane zone kreću od -1,89 m pa do 103,44 m (Slika 3.4). Ovih 103 metara je karakteristično za sjeverni dio izrezanog DEM-a, razlog tomu je Medvednica, međutim tako

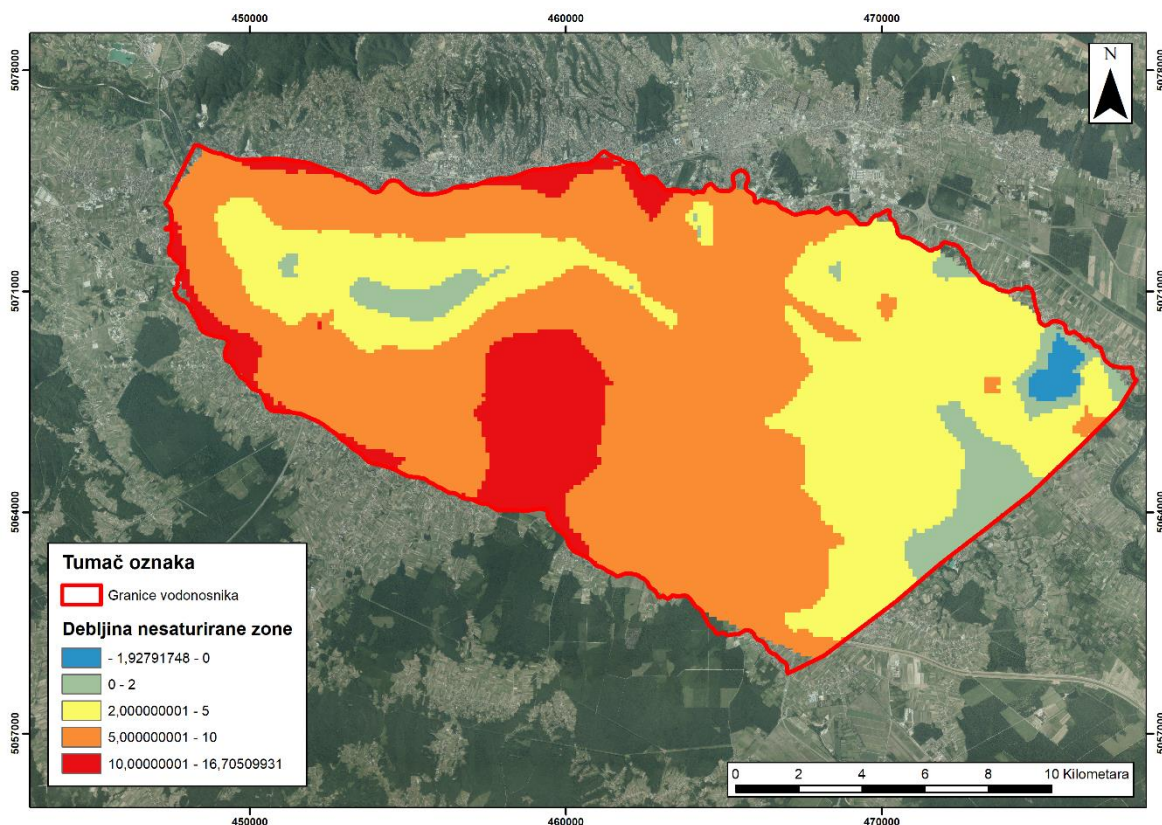
velike vrijednosti nije moguće naći unutar područja zagrebačkog vodonosnika, već se unutar vodonosnika vrijednosti kreću do 16 m.



*Slika 3.4. Prikaz nefiltriranih podataka o debljinama nesaturirane zone dobivenih c) metodom, s vrijednostima do 103,44 m*

Metodom d) dobivene su vrijednosti koje odgovaraju samom području vodonosnika (Slika 3.5). U tom slučaju vrijednosti debljine nesaturirane zone variraju od -1,93 m do 16,78 m. Vrijednosti nesaturirane zone na većini terena su ispod 8 m, dok vrijednosti veće od toga se mogu naći na rubnim dijelovima zagrebačkog vodonosnika te u južnom dijelu. Na ovaj način potvrđeno je ono što su dobili Ružičić et al. (2012) gdje je određeno da saturirana zona varira od 2 do 8 metara, zbog toga je ovakav sloj uzet u daljnje razmatranje.





*Slika 3.5. Karta debljine nesaturirane zone na području zagrebačkog vodonosnog sustava izraženih u metrima*

### 3.5. TEMPERATURA PODZEMNE VODE

Temperatura je ključan čimbenik za svaku kemijsku reakciju. Temperaturom u vodonosniku bavili su se mnogi autori koji su došli do brojnih zaključaka. Almasri et al. (2007), navode temperaturu kao jedan od čimbenika koji utječu na kinetiku nitrifikacije i denitrifikacije u vodonosnim slojevima. Domenico & Schwarz (1997) ukazuju da je unutar 10 m od površine terena podzemna voda značajno pod utjecajem sezonskih promjena u atmosferi, dok će ispod tih 10 m, odnosno u intervalu od 10 – 20 m od površine terena temperatura vode biti 1 – 2°C viša nego lokalna srednja godišnja temperatura atmosfere. Ispod dubine od 20 m, temperatura podzemne vode raste pravilno, sukladno geotermalnom gradijentu, te kako je temperatura krutih tvari određena geotermalnim gradijentom, tako se ova temperatura odnosi i na vodu.

Ipak, u slučaju zagrebačkog vodonosnika, rijetko se mjeri raspodjela temperature po dubini, već se uzima jedan podatak iz svakog pojedinog piezometra, zbog toga je u okviru ovog istraživanja u obzir uzet utjecaj prostorne raspodjele temperature na brzinu reakcije. Poznato

je da se povišenjem temperature povećava brzina reakcije. Prema Delleur (2007), tamo gdje su uvjeti povoljni, nitrifikacija je izrazito brza. U suhim i vrućim okolišima, trenutna dostupnost vode može isprati iz tla sve dušikove spojeve, koji mogu značajno utjecati i na rast biljaka i na vodonosni sustav. Važnost nitrifikacije u zagrebačkom vodonosniku potvrdili su Kovač et al., 2018. Korištene prosječne vrijednosti temperatura podzemne vode i koncentracija kisika, za razdoblje od 1991. do 2015. mjerene na piezometrima, preuzete su iz Kovač (2017).

Povišenjem temperature ubrzava se kemijska reakcija, što posljedično može ubrzati proces nitrifikacije u aerobnim sredinama i omogućiti transport nitrata na velike udaljenosti. S druge strane, određena istraživanja na zagrebačkom vodonosniku su pokazala kako povećanje temperature podzemne vode može dovesti do smanjene topivosti kisika u podzemnoj vodi (Marković et al., 2013), što može utjecati na smanjenje koncentracije nitrata te transformaciju u druge dušikove spojeve.

Lokacije na kojima se mjeri temperatura podzemne vode nalaze se u središnjem dijelu vodonosnika i određene su zbog lokacija crpilišta, što je stvaralo probleme prilikom interpolacije rubnih dijelova vodonosnika. Zato je napravljena ekstrapolacija. Prije same interpolacije i ekstrapolacije, uklonjene su vrijednosti koje se nalaze na istoj lokaciji. Razlog istih koordinata moguće je mjerenje po dubini ili piezometri u gnijezdu za koje je dana jedinstvena lokacija.

Na takvim su mjestima u obzir uzete maksimalne vrijednosti temperature jer veća temperatura znači i bržu reakciju. Od početnih 153 vrijednosti, nakon izbacivanja višestrukih ostalo je 138 vrijednosti. Nakon toga su podaci iz *MS Excel*-a ubačeni u *ArcMap*.

Za izradu karte raspodjele temperatura u vodonosniku, korištena je metoda *Kriging-a*. Teorijske osnove o ovoj metodi, kao i način odabira najbolje metode interpolacije, može se vidjeti u teorijskom pregledu Sluitera (2009). Također, korisnim se pokazalo istraživanje Bumbaka (2015) o metodama interpolacije, ali i usporedba metoda interpolacije u istraživanju Hofstra et al. (2008). Razlog za odabir metode *Kriging-a* je, što je jedna od najčešće korištenih metoda interpolacije u svijetu i generalno daje bolje rezultate od ostalih metoda interpolacije (Earls & Dixon, 2007). Na dobivenim kartama, vidljive su oštre linije, što spominje Bumbak (2015), međutim, karte pokazuju generalnu točnost, s obzirom na dobivene podatke, zbog čega su uzete u obzir za izradu završne karte.

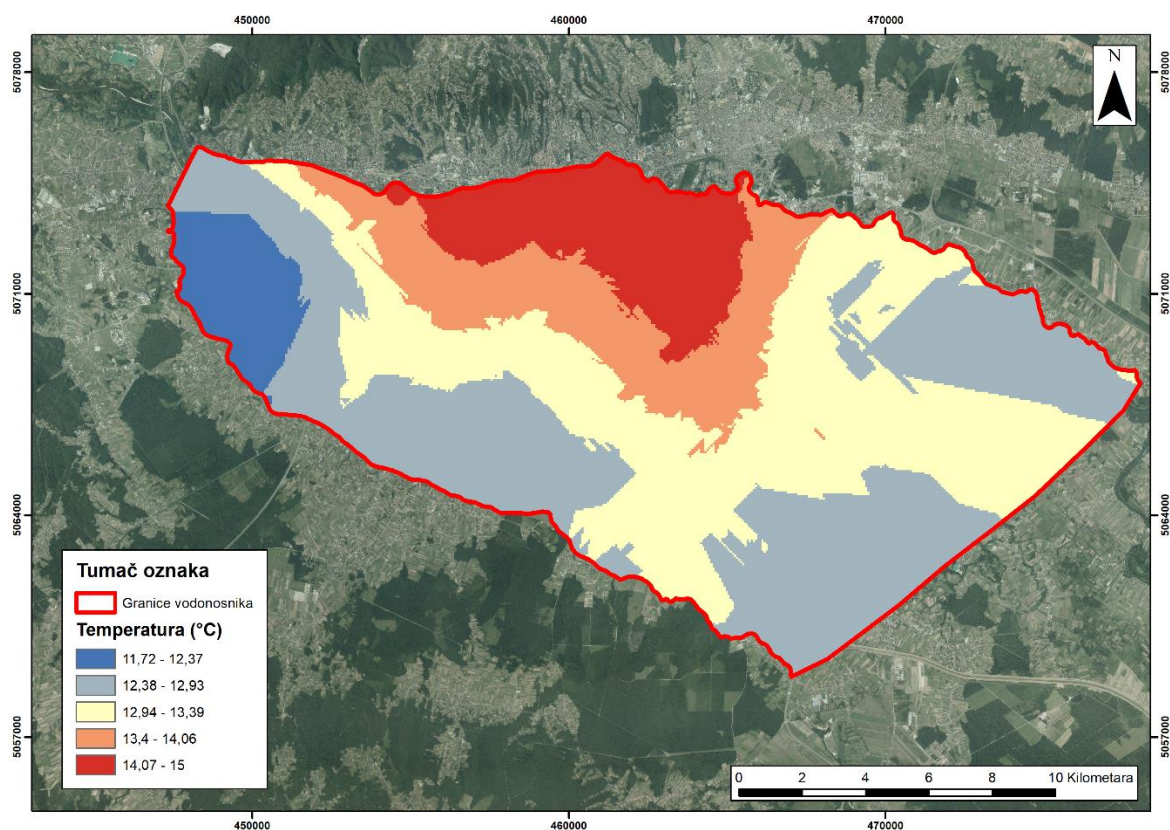


Karte su rađene na dva načina. Za obje interpolacije korištena je ekstenzija *Geostatistical Analyst*. Metodom *Kriging-a*, iz *Geostatistical Wizard-a* na *Geostatistical Analyst* alatnoj traci, dobivene su karte koje odgovaraju pravokutnom području na kojem se nalaze piezometri. Karte su rađene dvjema metodama unutar *Kriging-a*: metodom *Simple* i *Ordinary*. Za obje metode utvrđeno je da podaci ne pokazuju neki trend pa je tako i definirano u samom dijaloškom okviru. Ostale opcije nisu mijenjane. Dobivene karte pokazuju niže vrijednosti temperature na sjeveroistočnoj strani. Ovo smanjenje nalazi se u samom središtu vodonosnika, a dobivene karte ne zadovoljavaju veličinom cijelo područje vodonosnika.

Kako bi se dobila karta koja odgovara području cijelog vodonosnog sustava, napravljena je ekstrapolacija (*desni klik na Layer, Properties/ Extent/ the rectangular extent of Granice vodonosnika*). Rubni dijelovi vodonosnika zbog toga nemaju najtočnije podatke, posebno oni u jugoistočnom i istočnom dijelu. Ipak, karta dobivena *Simple* metodom pokazuje veću točnost (Slika 3.7), zbog čega je ona uzeta u obzir za izradu završne karte ranjivosti. Karta dobivena *Ordinary* metodom, pokazuje značajno smanjenje temperature u zapadnom dijelu vodonosnika (Slika 3.6). Ovakva karta pokazuje poklapanje s istraživanjima Bačani & Posavec (2014).

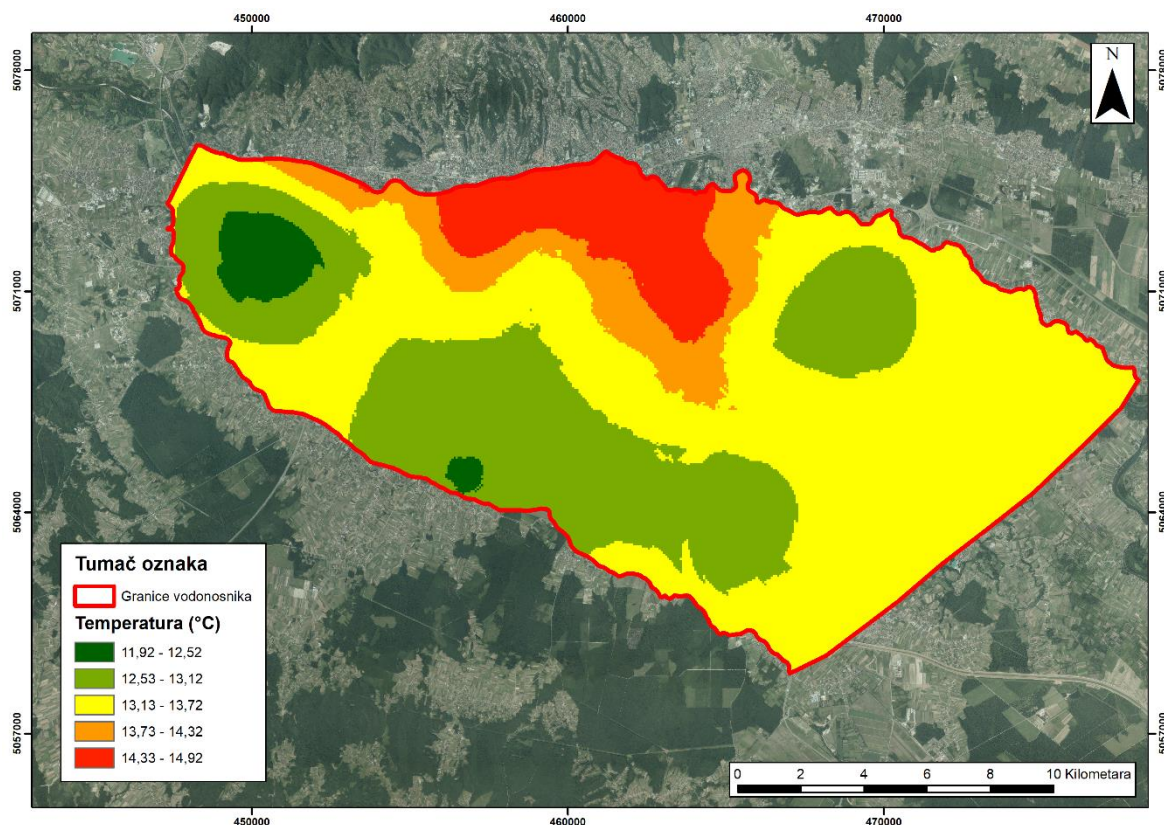
Interpolacijom je dobivena karta raspodjele temperature, srednje vrijednosti temperature na karti dobivenoj *Simple* metodom kreću se do 14,92 °C. Srednje vrijednosti temperatura podijeljene su u 5 kategorija (Slika 3.7):

- 11,92 – 12,52 °C
- 12,53 – 13,12 °C
- 13,13 – 13,72 °C
- 13,73 – 14,32 °C
- 14,33 – 14,92 °C



*Slika 3.6. Raspodjela temperatura u zagrebačkom vodonosniku, dobivene Ordinary metodom, a izražene u stupnjevima °C*

Da bi se dobiveni ekstrapolirani pravokutnik prilagodio izgledu vodonosnika, bilo ga je potrebno prebaciti u rasterski oblik. Za prebacivanje je poslužila naredba *ArcMap Toolbox/Geostatistical Analyst Tools/Working with Geostatistical Layers/GA Layer to Grid*, nakon čega je provedeno rezanje metodom *Data Management/Raster/Raster Processing/Clip*.



*Slika 3.7. Raspodjela temperatura u zagrebačkom vodonosniku, dobivena Simple metodom, a izražena u stupnjevima °C*

### 3.6. OTOPLJENI KISIK

Geokemijski gledano, sadržaj otopljenog kisika u podzemnoj vodi značajna je stavka u okviru zaštite podzemne vode. U slučaju ciklusa dušika, kisik ima značajnu ulogu jer kontrolira procese nitrifikacije i denitrifikacije (Balderacchi et al., 2012). U tlo i podzemnu vodu dušik većinom dolazi u obliku amonij iona  $\text{NH}_4^+$ , zbog pozitivnog naboja često se imobilizira na čestice tla, koje su negativno nabijene. U drugom slučaju amonij ioni mogu biti oksidirani u nitrite ( $\text{NO}_2^-$ ), što predstavlja prvi korak nitrifikacije (aerobna sredina). U drugom koraku uz pomoću autotrofnih nitrificirajućih bakterija, nitriti bivaju oksidirani u nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) (Lee et al., 2006). Nakon toga, proces se može nastaviti denitrifikacijom, odnosno procesom u kojemu nitrati prelaze u dušik u anaerobnim ili anoksičnim uvjetima (Balderacchi et al., 2012). Ovdje valja još spomenuti i prelazak organskog dušika mineralizacijom u amonij ione. Nitrati su topivi u vodi i izrazito mobilna forma dušika u podzemnoj vodi. Zbog svog negativnog naboja se ne adsorbiraju na čestice tla već su nošeni tokom vode, što omogućuje potencijalne štete na velikim površinama vodonosnika i cijelih sustava (Lee et al., 2006).

Na području zagrebačkog vodonosnika vrijednosti otopljenog kisika mjerene su na 153 lokacije koje se nalaze u blizini velikih izvorišta vode. Prema Kovač (2017), u piezometrima su mjerene vrijednosti otopljenog kisika u periodu od 1991. – 2015. godine. Prema dobivenim vrijednostima u Excelu, koje se kreću od 0,21 do 7,53 mg/l dobivena su interpolacijom (*Spatial Analyst/Interpolation/Kriging, Ordinary – Spherical*) tri intervala. Ova je interpolacija napravljena kako bi se kasnije mogla provjeriti točnost ekstrapolacije. Zone su određene prema vrijednostima: <1 mg/l, 1 – 2 mg/l i >2 mg/l O<sub>2</sub> (Kovač et al., 2017b), a naknadno su preoblikovane u <1 mg/l, 1 – 2 mg/l, 2 – 4 mg/l, 4 – 6 mg/l, >6 mg/l, zbog lakše vizualizacije karte.

Prema Kovač et al. (2017a) i Dimkić et al. (2008) gore navedene vrijednosti otopljenog kisika predstavljaju dominantno aerobne uvjete (>2 mg/l O<sub>2</sub>), dominantno anaerobne uvjete (<1 mg/l O<sub>2</sub>) i prijelaznu zonu (1 – 2 mg/l O<sub>2</sub>). Obradom podataka dobiveno je da je zapadni dio vodonosnika dominantno aeroban, dok se na istoku javljaju područja s anaerobnim uvjetima. Prijelazna zona nalazi se između aerobne i anaerobne zone s ponegdje lokalnim padovima vrijednosti otopljenog kisika u zapadnom dijelu vodonosnika.

Lokacije na kojima se nalaze piezometri u kojima se mjeri sadržaj otopljenog kisika nalaze se u središnjem dijelu vodonosnika, što je stvaralo probleme za interpolaciju u rubnim dijelovima vodonosnika. Isto tako, na pojedinim lokacijama postoji veći broj izmjerenih vrijednosti otopljenog kisika. Kako bi se dobila što točnija interpolacija, ali i kasnija ekstrapolacija, prvo su uklonjene višestruke vrijednosti na istim lokacijama.

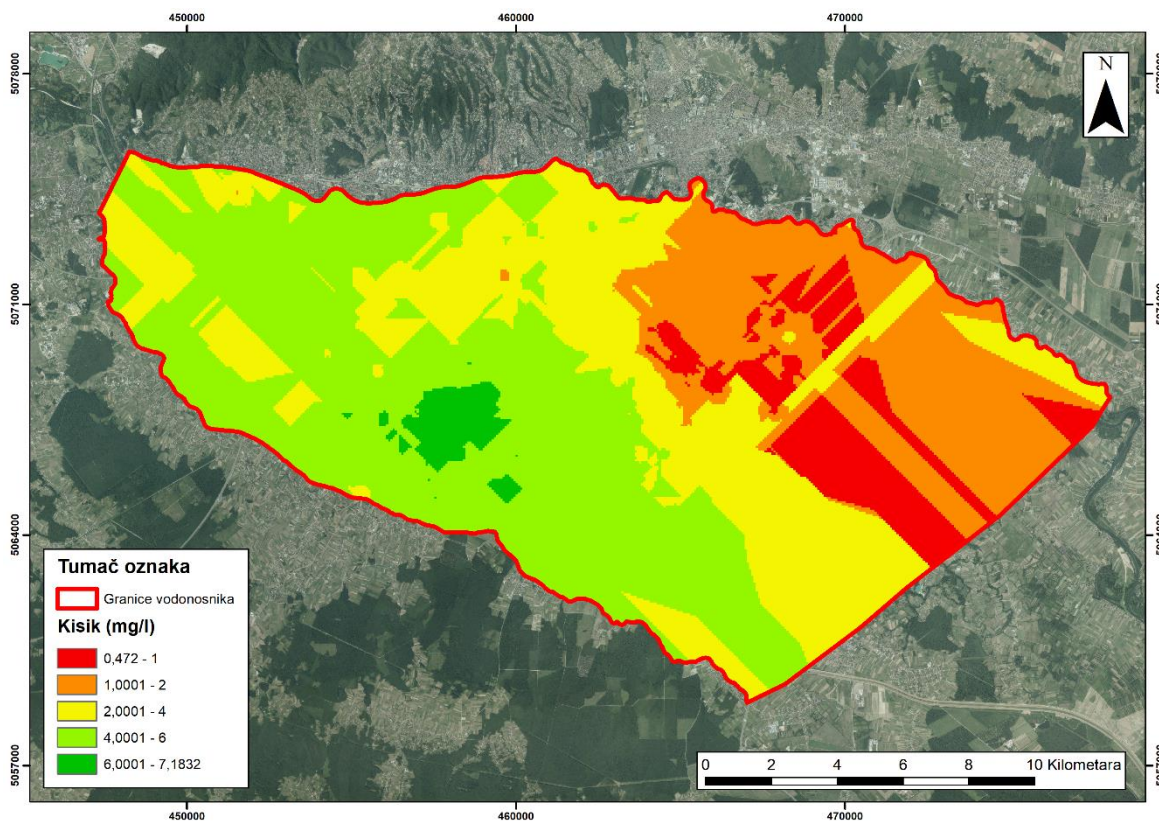
Od tih višestrukih vrijednosti ostavljena je ona najveća. Razlog tomu je što kisik pospješuje nitrifikaciju (Balderacchi et al., 2012). Od početnih 153 vrijednosti, nakon izbacivanja višestrukih ostalo je 138 vrijednosti. Nakon toga su podaci iz *MS Excel-a* ubačeni u *ArcMap*.

Karte su napravljene na dva načina, koji odgovaraju izradi karte raspodjele temperature. Za obje interpolacije korišten je *Geostatistical Analyst*. Metodom *Kriging-a*, iz *Geostatistical Wizard-a* na *Geostatistical Analyst* alatnoj traci, dobivene su karte koje odgovaraju pravokutnom području na kojem se nalaze piezometri. Karte su rađene dvjema metodama unutar *Kriging-a*: metodom *Ordinary* (Slika 3.8) i *Simple* (Slika 3.9). Za obje metode utvrđeno je da podaci ne pokazuju neki trend pa je tako i definirano u samom dijaloškom okviru. Ostale opcije nisu mijenjane. Dobivene karte pokazuju niže vrijednosti otopljenog kisika na sjeveroistočnoj strani. Ovakvo smanjenje nalazi se u samom središtu vodonosnika, a dobivene karte ne zadovoljavaju veličinom čitavo područje vodonosnika.

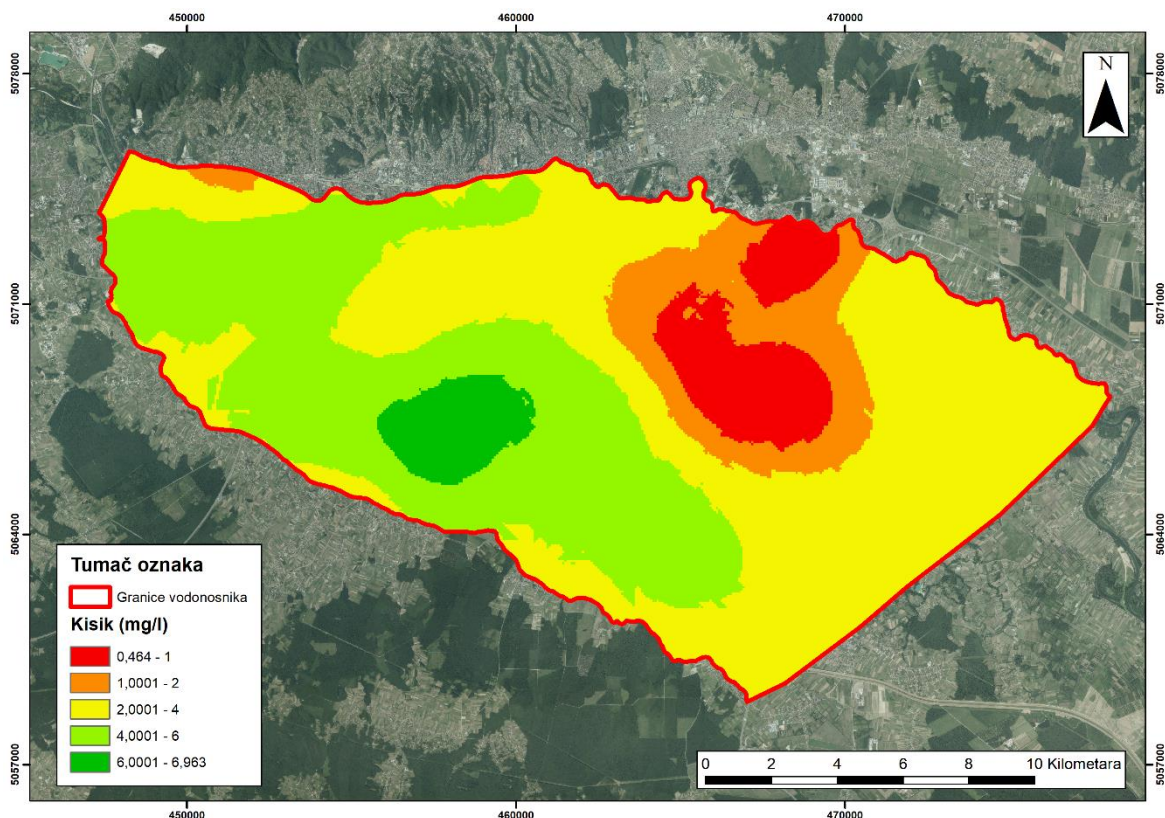


Kako bi se dobila karta koja odgovara području cijelog vodonosnika, napravljena je ekstrapolacija (desni klik na *Layer, Properties/Extent/the rectangular extent of Granice vodonosnika*). Rubni dijelovi vodonosnika zbog toga nemaju najtočnije podatke, posebno oni u jugoistočnom i istočnom dijelu. Ipak, karta dobivena *Ordinary* metodom pokazuje veću točnost, zbog čega je ona uzeta u obzir (Slika 3.8). Karta dobivena ovom metodom pokazuje smanjenje koncentracija otopljenog O<sub>2</sub> prema istoku, što odgovara i zadebljanju pokrova, odnosno produbljivanju vodonosnika.

Da bi se dobiveni ekstrapolirani pravokutnik prilagodio izgledu vodonosnika, bilo ga je potrebno prebaciti u rasterski oblik. Za prebacivanje je poslužila naredba *ArcMap Toolbox/Geostatistical Analyst Tools/Working with Geostatistical Layers/GA Layer to Grid*, nakon čega je provedeno rezanje metodom *Data Management/Raster/Raster Processing/Clip*.



*Slika 3.8. Prikaz raspodjele koncentracija otopljenog kisika u zagrebačkom vodonosniku, izraženih u mg/l. Karta jasno prikazuje generalni trend produbljivanja prema istoku, a dobivena je Ordinary metodom.*



*Slika 3.9. Karta raspodjele vrijednosti otopljenog kisika u zagrebačkom vodonosniku dobivena Simple metodom*

### 3.7. UTJECAJ POKROVA VODONOSNIKA (POLJOPRIVREDA)

Pokrov na području zagrebačkog vodonosnika djelomično je prekriven vegetacijom, dok je drugi dio prekriven urbanim površinama kao što su ceste, industrija i zgrade. Važnost ove stavke je upravo u različitim izvorima dušikovih spojeva na području vodonosnika. Urbane površine predstavljaju mjesto antropogenog utjecaja na pokrov i sam vodonosnik. U urbanim područjima razvijena je kanalizacijska mreža koja je često propusna, dok su u ruralnim područjima česte septičke jame koje također znaju propuštati otpadne vode (Kovač, 2017).

Nadalje, na različitim poljoprivrednim površinama koriste se razne vrste gnojiva, bilo prirodna bilo mineralna koja čine jedan od glavnih izvora dušikovih spojeva (Nakić et al., 2013; Li et al., 2010; Balderacchi et al., 2012). Svakako kao posebnu skupinu treba navesti otvorene građevinske jame i kopove koji, osim što su antropogenog podrijetla, izravno utječu na pokrovni sloj zagrebačkog vodonosnika zbog čega mogu učiniti još veću štetu.

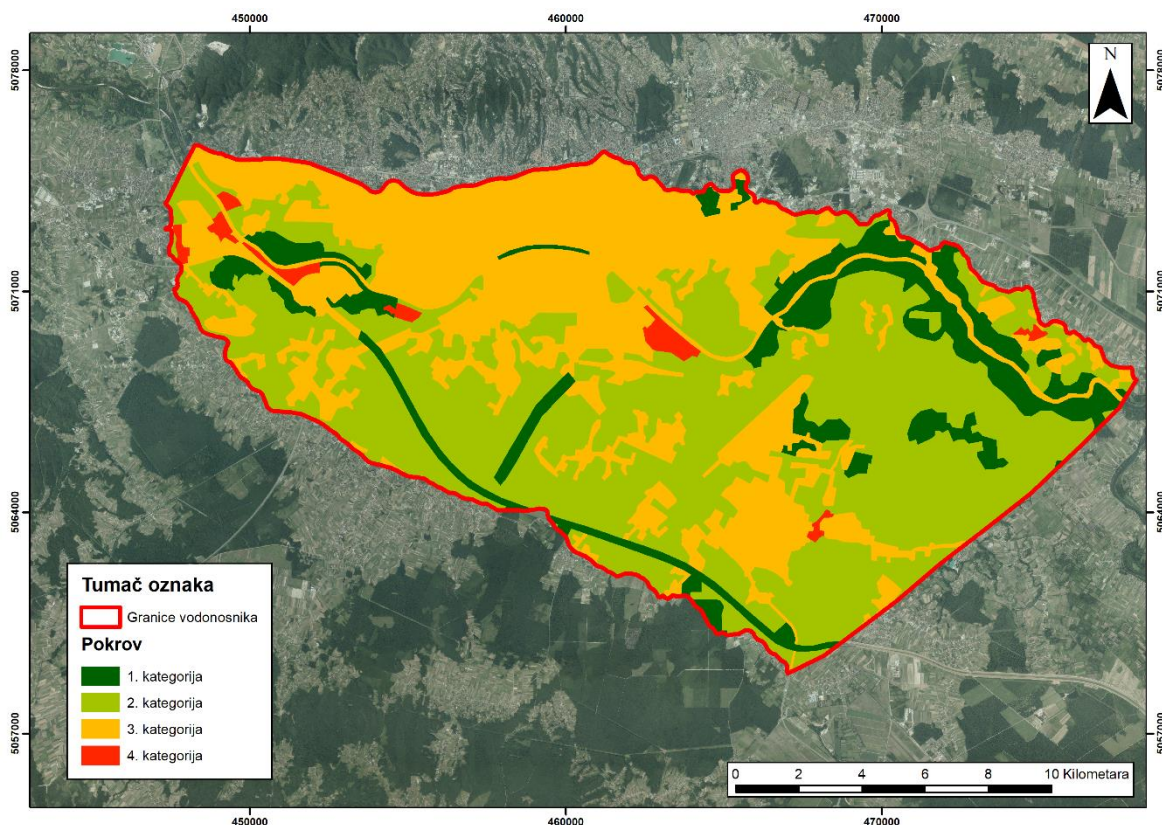
Pokrov tla određen je prema podlozi Hrvatske agencije za okoliš i prirodu CORINE Land Cover (CLC2012) iz 2012. godine (HAOP, 2018a). CLC2012 je podloga za cijelu Republiku

Hrvatsku. Naredbom *Arc Toolbox/Analysis Tools/Extract/Clip* izrezan je dio koji pripada zagrebačkom vodonosnom sustavu. Prema tome izrezu, vidljivo je da se površine na području zagrebačkog vodonosnika prema CLC2012 dijele u 20 kategorija. Svaka kategorija dobila je određeni kod korišten u ovom istraživanju (kodovi su prikazani u zagrada), te je tih 20 kategorija dalje podijeljeno u četiri kategorije prema razini opasnosti za vodonosnik (Slika 3.10):

- 1. kategorija – predstavljaju je prirodne i poluprirodne površine na kojima nema direktnog antropogenog utjecaja. Tu spadaju: pašnjaci (231), bjelogorična šuma (311) i mješovita šuma (313), sukcesija šume (324).
- 2. kategorija – predstavljaju je poljoprivredne i obradive površine: nenavodnjavano obradivo zemljište (211), voćnjaci (222), mozaik poljoprivrednih površina (242), pretežno poljoprivredno zemljište sa značajnim udjelom prirodnog biljnog pokrova (243),
- 3. kategorija – urbano područje: cjelovita gradska područja (111), nepovezana gradska područja (112), industrijski i komercijalni objekti (121), cestovna i željeznička mreža i pripadajuće zemljište (122), zračne luke (124), zelene gradske površine (141) i sportsko rekreacijske površine (142)
- 4. kategorija – mjesta eksploatacije mineralnih sirovina (131), odlagališta otpada (132), gradilišta (133) kao područja na kojima je direktno narušen pokrov vodonosnika i moguća je direktna infiltracija u slučaju nezgode.

Može se reći da je ova podjela vrlo slična podjeli u CLC2012 (HAOP, 2018a) prema polju CODE\_LEV3 u atributnoj tablici. Ova je podjela vidljiva u atributnoj tablici sloja, a glasi: 100 – umjetne površine; 200 – poljoprivredna područja; 300 – šume i poluprirodna područja; 400 – vlažna područja; 500 – vodene površine.





*Slika 3.10. Prikaz pokrova zagrebačkog vodonosnika s podjelom po kategorijama koje su objašnjene u prethodnom tekstu*

### 3.8. INDUSTRIJA

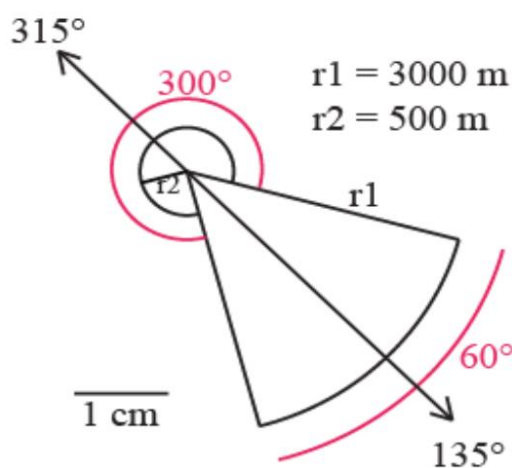
Na području zagrebačkog vodonosnika, prema dobivenim podacima utvrđeno je 12 potencijalnih onečišćivača vodonosnika (HAOP, 2018b). Svaki pojedini potencijalni onečišćivač ima i po nekoliko mogućih lokacija na kojima može doći do ispuštanja i onečišćenja vodonosnika.

Razlog uzimanja industrije u obzir jest činjenica, da se voda u industriji koristi za razne namjene: čišćenje, zagrijavanje, hlađenje, itd. Količina vode koja se crpi za potrebe industrije je veća nego što su stvarne potrebe u industrijskoj proizvodnji, pa su zbog toga i količine otpadne vode iz industrije velike (*British Geological Survey, 2008*). Ukoliko se industrijski efluenti ne tretiraju kako bi trebali, mogu prouzročiti ozbiljnu štetu podzemnoj vodi. Uz to, i količine otpada i potencijalnih onečišćujućih tvari iz industrije su brojne. Prilikom transporta tih onečišćivala kroz vodonosnik bitna su njihova svojstva, odnosno topivost u vodi i gustoća (Shankar et al., 2008).



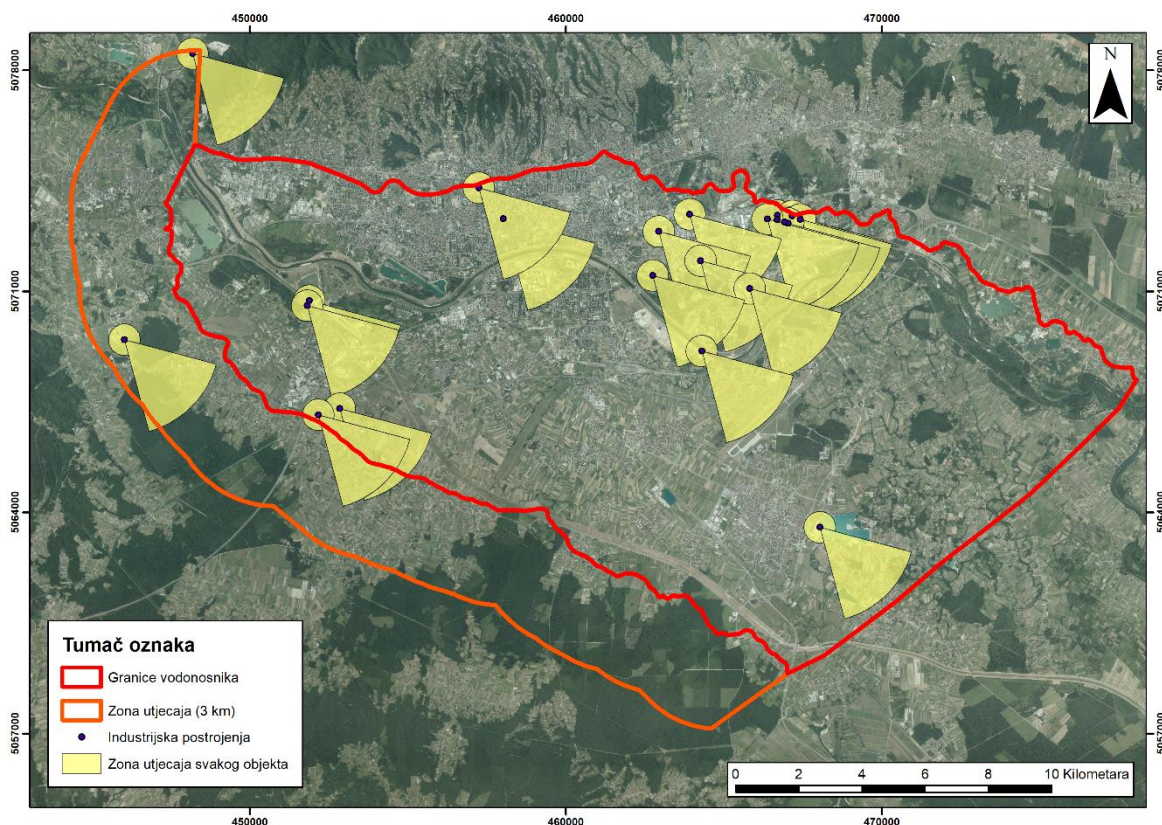
Bhadra et al. (2013) su tijekom svog istraživanja zagađenja rijeke Bandi (Indija) koristili *buffer* zonu od 3 km od rijeke. Razlog tomu je što su oni uz rijeku imali glavne izvore onečišćenja (muljeve iz industrijskih otpadnih voda), koji su odlagani uz rijeku bez nadzora. Istraživanjima je uočeno, da je utjecaj ovog zagađenja prisutan do 3 km od rijeke. Iako je ovo ekstreman primjer zagađenja uzrokovanog industrijom, na području rijeke Bandi podzemna voda se pojavljuje u kvartarnim aluvijalnim naslagama, što odgovara području zagrebačkog vodonosnika. Zbog toga je za potrebe analize utjecaja industrije na zagrebački vodonosnik uzeta *buffer* zona od 3 km oko svakog industrijskog objekta. U obzir je uzet i smjer toka vode, pa je *buffer* zona izduženiya prema jugoistoku.

Kako bi se iz *shapefile-a* koji obuhvaća cijelu Republiku Hrvatsku izdvojili samo oni industrijski izvori koji predstavljaju prijetnju zagrebačkom vodonosniku, korištena je naredba *Arc Toolbox/Analysis Tools/Extract/Clip*, nakon čega je svakom točkastom podatku bilo potrebno napraviti zonu utjecaja (*buffer* zonu). Za izradu zona utjecaja svakog pojedinog industrijskog objekta korišten je dodatak za *ArcMap*, softver *ET Geowizards* (ET SpatialTechniques, 2018) u kojemu su napravljene *buffer* zone od dva kružna luka: kružni luk u smjeru toka vode imao je radijus 3000 m i kut od 60°, a smjer pružanja ovog luka je 135°; drugi je kružni luk bio u smjeru 315°, radijus mu je 500 m, a kut 300° (Slika 3.11).



Slika 3.11. Prikaz korištene *buffer* zone za određivanje površine utjecaja industrije i farmi

Na taj su način dobivena dva *shapefile-a* koji su onda ručno spajani za svaku lokaciju pojedinačno (naredbom: *Geoprocessing/Merge*). Dobivene su *buffer* zone za svaki industrijski objekt, koje su onda spojene u jedan *shapefile* (Slika 3.12).



*Slika 3.12. Prikaz industrijskih objekata i njihovih zona utjecaja na zagrebački vodonosni sustav*

### 3.9. KANALIZACIJA I SEPTIČKE JAME

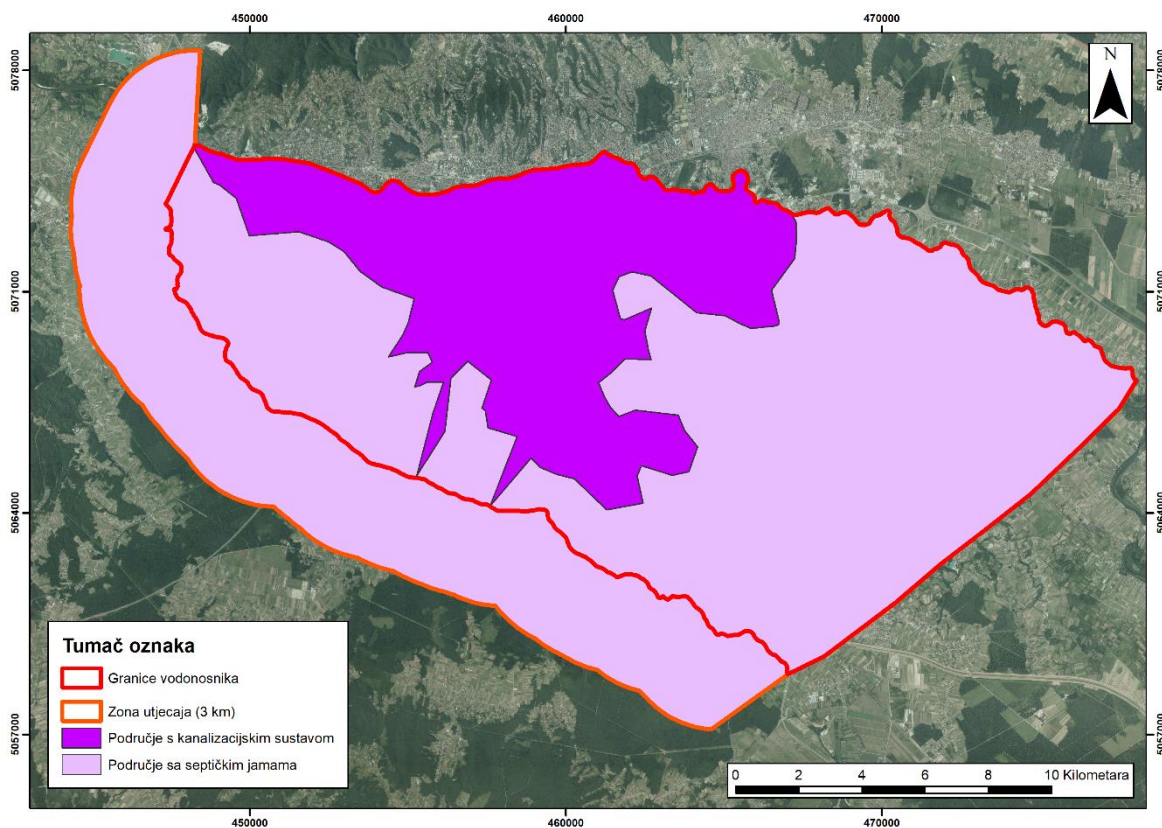
Kanalizacijski sustav i septičke jame predstavljaju značajan problem prilikom razmatranja ranjivosti vodonosnika na dušikove spojeve. Brojni autori ih navode kao jedan od glavnih izvora dušikovih spojeva u vodonosnim sustavima (Balderacchi et al., 2012). Almasri et al. (2007) navode da su sustavi septičkih jama jedan od glavnih izvora onečišćenja nitratima u podzemnim vodama te da se u njima proizvode značajne količine dušika i njegovih spojeva.

Delleur (2007) navodi da brojni veliki gradovi, zbog svoje prenapučenosti, dovode dodatnu vodu u urbana područja, pri čemu povećavaju opterećenje u kanalizacijskoj mreži. Dio te dopremljene vode se ponovno infiltrira kroz septičke jame, propusnu kanalizacijsku mrežu i vodoopskrbnu mrežu. Lee et al. (2006) navode da su dušik i njegovi spojevi porijeklom iz otpadnih voda, najčešći onečišćivači podzemnih voda, a mogu u podzemne vode doći iz, između ostalog, septičkih jama.

Na području Grada Zagreba i zagrebačkog vodonosnika, propusni kanalizacijski sustav i septičke jame također predstavljaju jedan od glavnih izvora dušikovih spojeva u podzemnoj

vodi. Nakić et al. (2013) navode da uz intenzivnu poljoprivrednu proizvodnju, septičke jame i propusna kanalizacijska mreža predstavljaju glavne izvore nitrata. Ovakva istraživanja potvrdio je i Kovač (2017).

Prema Kovač et al. (2018), korišten je poligon unutar kojeg je razvijena kanalizacijska mreža na području zagrebačkog vodonosnika. Poligon većim dijelom prekriva uže gradsko područje i većinom se nalazi na lijevoj obali rijeke Save. Nešto manji dio poligona prelazi na desnu obalu Save, na kojoj također prekriva urbano područje. Stoga se do površine na kojoj su septičke jame došlo indirektnom metodom. Pretpostavljeno je da ona područja koja nisu obuhvaćena tim poligonom nemaju razvijenu kanalizacijsku mrežu, već imaju septičke jame. S obzirom da je za potrebe određivanja utjecaja farmi i industrije oko zapadnih i južnih granica vodonosnika napravljen *buffer* od 3 km, poligonu septičkih jama dodana su i ta područja (Slika 3.13).



*Slika 3.13. Prikaz površine zagrebačkog vodonosnika s razvijenom kanalizacijskom mrežom i površine zagrebačkog vodonosnika sa septičkim jamama.*

### 3.10. FARME

Na širem području zagrebačkog vodonosnika zabilježen je niz farmi (1174). Prema dobivenom *shapefile-u* vidljivo je da se većina farmi na području zagrebačkog vodonosnika nalazi u njegovom južnom dijelu, odnosno na desnoj obali Save. Nešto manji broj, može se naći na lijevoj obali Save, ali ta je brojka gotovo zanemariva.

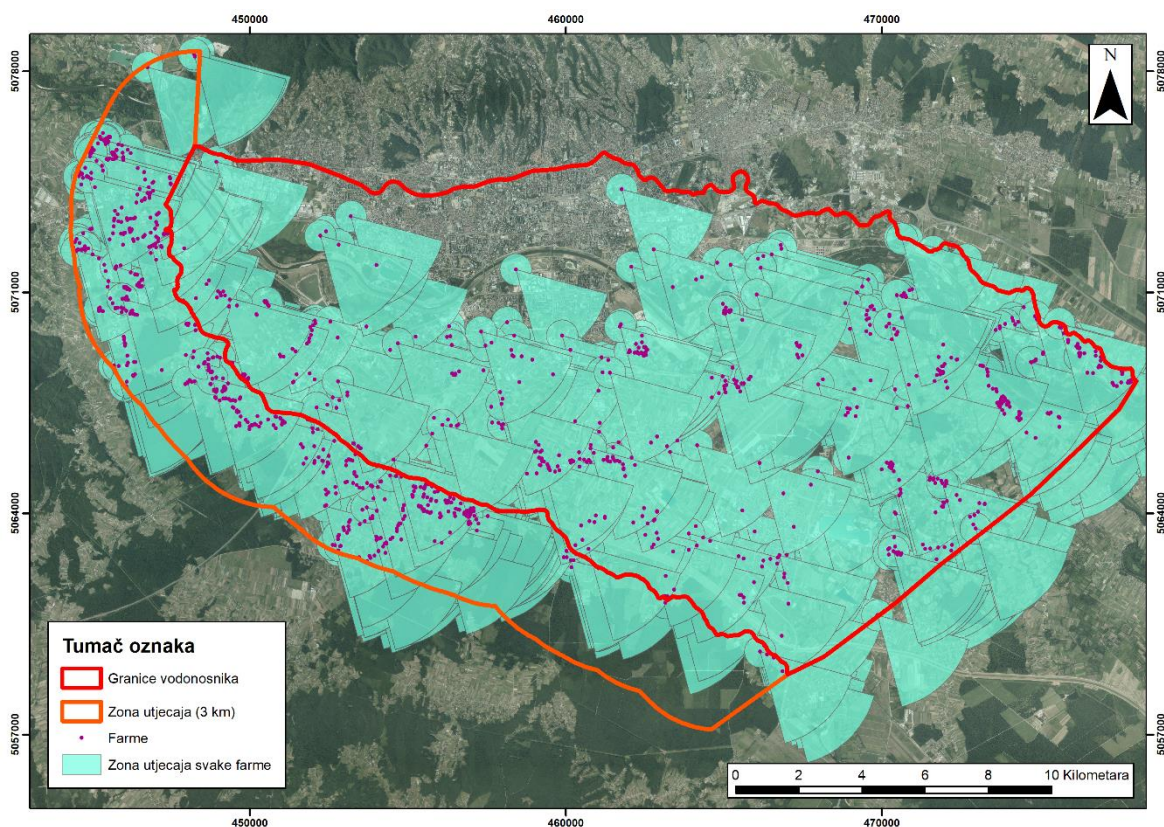
Farme se uzimaju kao značajan izvor dušikovih spojeva u tlu i podzemnim vodama, jer se iz urina životinja, kao i njihovih fekalija izlučuje dušik, u obliku uree, koji procesom nitrifikacije prelazi u druge spojeve (Roche et al., 2016). Prema istraživanju Roche et al. (2016), ukoliko se gustoća krava kreće od 2,2 do 4,3 krave/ha, iz njihovog urina može se isprati do 800 kg/ha dušika godišnje. Daljnjom infiltracijom, dušik procesom nitrifikacije prelazi u nitrates u podzemnoj vodi. Za samo područje zagrebačkog vodonosnika nije poznat broj krava po hektaru, a može se pretpostaviti i da na području zagrebačkog vodonosnika ne postoji samo uzgoj krava, već i ostale stoke i peradi, međutim, točni podaci nisu poznati.

Za GIS bazu podataka je uzet u obzir *shapefile* s farmama u sjeverozapadnom dijelu Republike Hrvatske. Podaci iz Registra farmi, dobiveni su od Hrvatske poljoprivredne agencije, a koristio ih je Kovač (2017). Kako bi se dobile farme koje utječu na sam vodonosnik, napravljena je *buffer* zona (*Arc Toolbox/Analysis Tools/Proximity/Buffer*) oko granica vodonosnika od 3 km, kao i u prethodnom sloju. Nakon toga je napravljen *Clip* (*Arc Toolbox/Analysis Tools/Extract/Clip*) po granicama *buffer* zone kako bi se dobile farme koje utječu na vodonosnik. *Buffer* zona za svaku pojedinu farmu uzeta je 3 km u smjeru toka, ova je vrijednost preuzeta od Bhadra et al. (2013), koji su radili *buffer* zonu za industrijski otpad na kvartarnim aluvijalnim naslagama. Oko svake farme napravljena je *buffer* zona od 3 km u smjeru jugoistoka (135°) i 0,5 km u smjeru zapada, sjevera i juga s glavnim smjerom prema sjeverozapadu (315°), kako bi se dobilo područje utjecaja svake pojedine farme. Kružni luk u smjeru jugoistoka ima kut od 60°, dok onaj prema sjeverozapadu ima tupi kut od 300° (Slika 3.11). *Buffer* zone su rađene pomoću softverskog proširenja *ET Geowizards* (ET SpatialTechniques, 2018) koji ima ograničenje za do 100 točkastih podataka istovremeno. Zbog toga su 1174 farme, koliko ih se nalazi na širem području zagrebačkog vodonosnika, podijeljene u 13 skupina: 11 skupina po 90 farmi, jedna skupina s 91 farmom i jedna skupina s 93 farme.

Zatim je bilo potrebno spojiti dva kružna luka za svaku pojedinu farmu, to je napravljeno naredbom *Geoprocessing/Merge*, ručno za svaku farmu posebno. Nakon toga su svi pojedini



kružni lukovi (*buffer zone*) spojeni u jedan *shapefile* radi lakšeg upravljanja. Na ovaj način, dobivene su odvojene *buffer zone* za svaku pojedinu farmu, kojima se može dodijeliti težinski faktor. Ovakve odijeljene *buffer zone* ne bi bile moguće, da kružni lukovi nisu spajani za svaku farmu posebno (Slika 3.14).



*Slika 3.14. Prikaz svih farmi na području zagrebačkog vodonosnika i njihovih zona utjecaja*

### 3.11. FORMULA ZA PRORAČUN INDEKSA RANJIVOSTI

Kako bi se dobila završna karta – karta specifične ranjivosti zagrebačkog vodonosnika na dušikove spojeve, bilo je potrebno razraditi matematičku formulu po kojoj će se izračunavati težinske vrijednosti za svaku točku. S obzirom da postoji niz različitih formula koje se koriste za ovakve proračune, korišteni su jednostavni matematički odnosi za dobivanje korištene formule. Korištena formula ima elemente DRASTIC (Aller et al., 1987) i SINTACS metoda (Cvita & De Maio, 1997, objašnjeno kod Loborec, 2013):

$$IR = n \times S + n \times UZ(x, y) + n \times K + n \times T(x, y) + n \times O(x, y) + n \times C + \\ + n \times (K, S_f) + n(F) + n(I) \quad (3-1)$$

gdje je *IR* indeks ranjivosti, a *n* težinski faktor. Ostale oznake objašnjene su u Tablici 3.2.

Tablica 3.2. Prikaz težinskih faktora svi čimbenika koji su uzeti u obzir tijekom izrade završne karte ranjivosti

Proračun ranjivosti			
		Kategorija	Težinski faktor (dodjeljuju se vrijednosti 1 - 10, 10 označava izuzetno ranjivo, a 1 neranjivo)
Prirodni parametri	Tlo (S)	vodena tijela i urbane površine	0
		aluvijalna	9
		euterično smeđe tlo i močvarno glejno tlo	6
		pseudoglej	3
	Debljina nesaturirane zone (NZ/m)	<0	10
		0 - 2	8
		2 - 5	6
		5 - 10	4
		≥10	2
	Hidraulička vodljivost (K/m/dan)	50 - 300	8
		300 - 1000	9
		>1000	10
	Kisik (O/mg/l)	0,472 - 1,000	1
		1,001 - 2,000	3
		2,001 - 4,000	5
		4,001 - 6,000	7
		6,001 - 7,183	9
Poluprirodni parametri	Temperatura (T/°C)	11,92 - 12,52	4
		12,53 - 13,12	5
		13,13 - 13,72	6
		13,73 - 14,32	7
		14,33 - 14,92	8
	Pokrov (C)	1. razina	2
		2. razina	4
		3. razina	6
		4. razina	8
Izvori dušikovih spojeva	Kanalizacija/septičke jame	Kanalizacija (K)	7
		Septičke jame (SJ)	9
	Farme (F)	Cijeli sloj	6
	Industrija (I)	Cijeli sloj	8

Da bi se dobila završna karta korištena je naredba: *ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator/Plus*. Za ovu je naredbu bilo potrebno prebaciti sve *shapefile*-ove u rastere. Prije toga dodijeljeni su težinski faktori svakom pojedinom čimbeniku (Tablica 3.2). Da bi se dobili rasterski slojevi korišteni su različiti načini. Za jednostavne *shapefile*-ove, poput slojeva hidrauličke vodljivosti, tla, pokrova, kanalizacija i septičkih jama, farma te industrije dodane su vrijednosti težinskih faktora u atributnu tablicu i nakon toga je vektorski sloj prebačen u rasterski naredbom *ArcToolbox/Conversion Tools/To Raster/Polygon to Raster*. Za podatak po kojem se vrši pretvorba uzet je stupac težinskih faktora iz atributne tablice. Kod izrade karte tala u obzir nisu uzete urbane površine i vodena tijela, odnosno dodijeljen im je težinski faktor 0. Razlog tomu je što je na takvim mjestima izostaje prirodno tlo, te su takve lokacije obuhvaćene u okviru sloja „Pokrov“ vodonosnika.

Kod slojeva farmi i industrije bilo je prvo potrebno stvoriti zajednički poligon od odvojenih *buffer*-a. Razlog tomu je što prethodno nije pronađen način da bi se svakom pojedinom *buffer*-u dodijelio zaseban faktor, te njegov težinski udio uzeo u obzir. Zbog toga je napravljen zajednički poligon naredbom *ArcToolbox/Cartography Tools/Generalization/Aggregate Polygons* te je od *shapefile*-a *buffer* zone vodonosnika, naredbom *ArcToolbox/Analysis Tools/Overlay/Symmetrical Difference*, oduzet *shapefile* farmi, te su ta dva poligona zajedno spojena naredbom *Geoprocessing/Merge*. Nakon toga su u atributnoj tablici završnog *shapefile*-a dodane težinske vrijednosti svakom poligonu i naredbom *ArcToolbox/Conversion Tools/To Raster/Polygon to Raster*, s obzirom na težinske faktore, napravljene rasterske datoteke farmi i industrije.

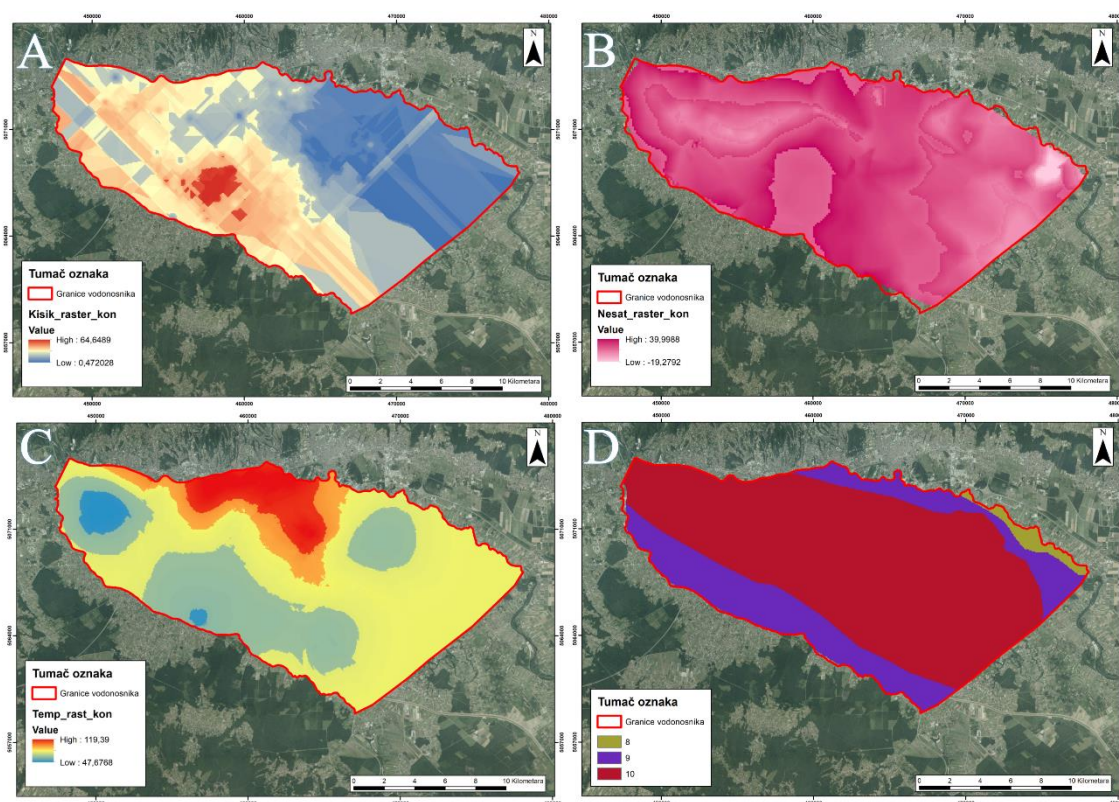
Za slojeve nesaturirane zone, temperature i otopljenog kisika koji su već bili u obliku rastera korištena je prvo naredba *ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Map Algebra/Raster Calculator/Con* pomoću koje je napravljena klasifikacija rasterskog sloja. Izraz po kojem se koristila naredba *Con* na primjeru sloja debljine nesaturirane zone izgleda:

$$\text{Con ("zagreb\_minus\_101" < 0, 10, Con ("zagreb\_minus\_101" < 2, 8, Con ("zagreb\_minus\_101" < 5, 6, Con ("zagreb\_minus\_101" < 10, 4, Con ("zagreb\_minus\_101" \geq 10, 2))))))}$$

gdje je „zagreb\_minus\_101“ naziv za sloj „Debljina nesaturirane zone“ u bazi podataka. Nakon što je dobivena takva klasifikacija, rasterski sloj dobiven naredbom *Con* pomnožen je s rasterskim slojem „zagreb\_minus\_101“ kako bi se dobile težinske vrijednosti u svakoj

točci zagrebačkog vodonosnika. Prikaz dobivenih rasterskih slojeva, koji su korišteni za izradu najbolje završne karte, prikazan je na Slikama 3.15 i 3.16.

Na Slici 3.15 prikazani su rasterski slojevi za otopljeni kisik (A), nesaturiranu zonu (B), temperaturu (C) i hidrauličku vodljivost (D). Vidljivo je da se vrijednosti otopljenog kisika kreću od 0,47 do 64,65. Ovakve su vrijednosti rezultat množenja težinskih faktora s vrijednostima otopljenog kisika izraženim u mg/l, što je već ranije objašnjeno. Vrijednosti umnožaka debljine nesaturirane zone i odgovarajućih težinskih faktora kreću se od -19,28 do 40, a temperature od 47,68 do 119,39. Pod D) na Slici 3.15 je vidljiv težinski udio hidrauličke vodljivosti u rasterskom obliku, a vrijednosti se kreću od 8 do 10.

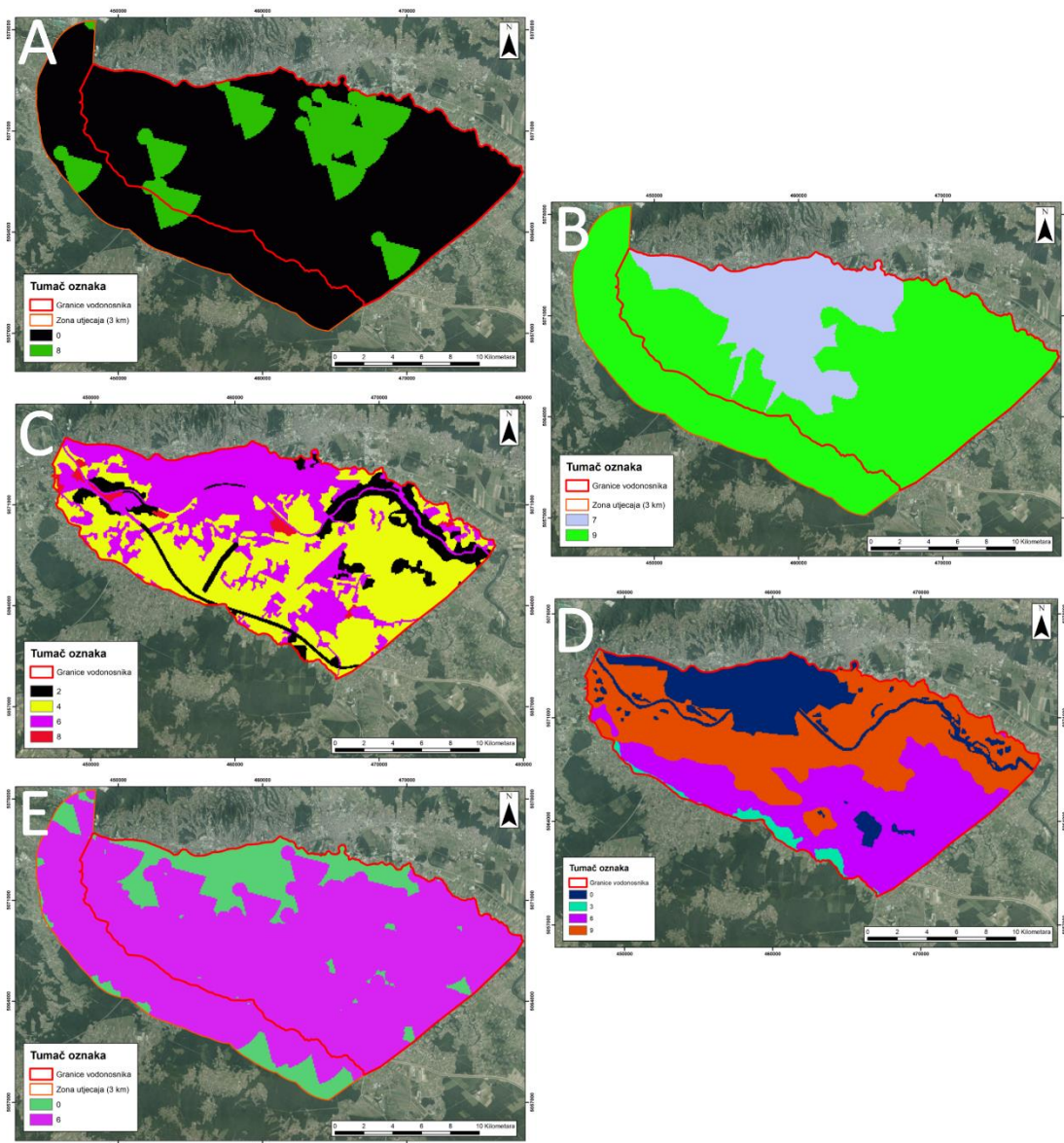


*Slika 3.15. Prikaz pripremljenih rasterskih slojeva za daljnju obradu za dobivanje završne karte*

Slika 3.16 prikazuje preostale korištene rasterske slojeve. Pod A) je vidljiv rasterski sloj za industriju, a uočavaju se dvije vrijednosti: 8 – kao težinski faktor svakog pojedinog industrijskog objekta i 0 – kao površina koja nije pod utjecajem industrijskih objekata. Ovakav je odnos vidljiv i pod E), gdje je za svaku farmu uzet težinski faktor 6. Odnos kanalizacijske mreže i septičkih jama (B) dan je kroz težinske faktore 7 odnosno 9 za septičke jame. Pod C) je vidljiv rasterski sloj vezan uz pokrov vodonosnika podijeljen u 4



kategorije vidljive na Slici 3.10 i objašnjen u poglavlju 3.7, a vrijednosti težinskih faktora jesu 2, 4, 6, 8, što je vidljivo i u Tablici 3.2. Pod D) na Slici 3.16, vidljiv je odnos različitih vrsta tala na području zagrebačkog vodonosnog sustava s vrijednostima 0, 3, 6, i 9. Težinski faktor 0 dodijeljen je urbanim površinama i vodenim tijelima.



*Slika 3.16. Prikaz pripremljenih rasterskih slojeva za daljnju obradu za dobivanje završne karte.*

Za potrebe izrade i odluke o najboljoj karti ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava napravljeno je nekoliko iteracija kod kojih su dodjeljivani drugačiji težinski faktori. Prikaz različitih težinskih faktora može se vidjeti u Prilogu 1. Prikaz različitih karata ranjivosti može se vidjeti u Prilog 2 – Prilog 7.

## 4. REZULTATI I DISKUSIJA

### 4.1. PREGLED DOBIVENIH SLOJEVA

Dobiveni slojevi čine dijelove potrebne za izradu završne karte specifične ranjivosti vodonosnika na dušikove spojeve. Prvi promatrani sloj predstavlja raspodjelu hidrauličke vodljivosti u zagrebačkom vodonosniku (Slika 3.2). Općenito su hidrauličke vodljivosti izrazito visoke i realno ih je smatrati značajnima za širenje onečišćenja. Međutim, za potrebe ovog rada su podijeljene u tri grupe kako je već ranije navedeno. Da bi se dočarao stvarni utjecaj, dodijeljeni su najveći težinski faktori: 8 za vrijednosti hidrauličke vodljivosti 50 – 300 m/dan, 9 za vrijednosti hidrauličke vodljivosti 300 – 1.000 m/dan, i 10 za vrijednosti hidrauličke vodljivosti >1.000 m/dan (Tablica 3.2).

Tlo predstavlja prirodni pokrov vodonosnika i prema dobivenoj karti podijeljeno je u tri skupine koje odražavaju svojstva tla da propušta onečišćenja (Slika 3.3). Aluvijalna tla zbog svojih svojstava (rahlosti i propusnosti) se smatraju kao najopasniji prirodni pokrov na promatranom području jer propuštaju sva onečišćivala, pa im je dodijeljen težinski faktor 9. Eutrično smeđe tlo i močvarna glejna tla imaju osrednjena retencijska svojstva pa im je i dodijeljen manji težinski faktor (6) nego aluvijalnim tlima. Ipak, pseudoglej pokazuje najbolja svojstva na promatranom području i smatra se najboljim prirodnim pokrivačem vodonosnika, zbog čega je i dobio najmanji težinski faktor od navedenih tala (3).

Karta debljine nesaturirane zone (Slika 3.5) pokazuje debljinu od površine terena do vodnog lica za visoke vode. Vrijednosti debljine nesaturirane zone kreću se između -1,93 m i 16,78 m. Razlog uzimanja visokih voda je što je u tom periodu vodno lice na najvišoj razini i voda tada može isprati čestice onečišćivala koje inače ne bi isprala. Na Slici 3.5 je vidljivo da je na nekim područjima debljina nesaturirane zone negativna. Negativne vrijednosti nesaturirane zone označavaju područja na kojima je voda na površini terena, odnosno poplavljena područja. Ovakvo se područje nalazi u sjeveroistočnom dijelu vodonosnog sustava.

Karta raspodjele vrijednosti temperature napravljena je dvjema metodama. Obje metode imaju svoje prednosti. Tako karta napravljena *Simple* metodom pokazuje generalnu točnost za područje cijelog vodonosnika. Zbog toga je ova karta uzeta u obzir prilikom izrade završne karte, kako je već spomenuto ranije (Slika 3.7). Karta dobivena *Ordinary* metodom (Slika 3.6) pokazuje daleko veću točnost u zapadnom području vodonosnika. Na tom su

području prikazane niže temperature podzemne vode. Ovakvi podaci se mogu protumačiti dotokom vode sa zapada, što odgovara istraživanjima Bačani & Posavec (2014). Značajno je spomenuti da su karte prilično slične. Obje karte temperature pokazuju niže temperature u zapadnom dijelu vodonosnika, a srednje do niže temperature u istočnom. Također, obje karte ukazuju na visoke temperature u sjevernom dijelu. Ove visoke temperature prouzročene su prostiranjem grada Zagreba i njegove infrastrukture koja utječe na temperature u vodonosniku, dok su na preostaloj površini vodonosnika temperature niže.

Karta koncentracija otopljenog kisika na području zagrebačkog vodonosnika također je izrađena pomoću obje metode interpolacije. Karta dobivena *Ordinary* metodom, pokazuje veću točnost (Slika 3.8). Na karti (Slika 3.8) je vidljivo da su značajno više koncentracije otopljenog kisika u zapadnom dijelu vodonosnika i one opadaju prema istoku. Ovakvo opadanje koncentracija otopljenog kisika odgovara produbljivanju vodonosnika na istoku (Bačani & Posavec, 2014). Iako ova karta (Slika 3.8) ima izrazito ravne granice s oštrim rubovima (Bumbak, 2015), uzeta je u obzir jer prikazuje odnose koji se očekuju na rubovima vodonosnika, kao i odnose koji se očekuju u središtu vodonosnika. Obje karte (Slika 3.8 i Slika 3.9) pokazuju jednake trendove u unutrašnjosti, dok se rubovi razlikuju, zbog čega je u obzir za izradu završne karte uzeta karta na Slici 3.8.

Karta pokrova vodonosnika izrađena je pomoću CLC2012 podloge (HAOP, 2018a). Prema svojstvima pokrova formirane su četiri kategorije spomenute ranije u tekstu. Na karti pokrova na Slici 3.10 vidljivo je da prevladavaju 2. i 3. kategorija. Ove kategorije predstavljaju i glavne izvore dušikovih spojeva na području zagrebačkog vodonosnika. Kategorija 2. obuhvaća poljoprivredne i obradive površine, dok kategorija 3. obuhvaća urbana područja. U prethodnim istraživanjima utvrđeno je da dušikovi spojevi na zagrebačkom području uglavnom potječu iz ovih izvora (Nakić et al., 2013, Kovač, 2017;). Preostale dvije kategorije zastupljene su na puno manjoj površini.

Karta površina utjecaja industrije je vidljiva na Slici 3.12. Na Slici 3.12 se može vidjeti da na zagrebačkom području nema velikog broja industrijskih objekata. Ipak, većina objekata je smještena u sjevernom dijelu vodonosnika, odnosno u istočnom dijelu Grada Zagreba. Na tom je području preklapanje površina pod utjecajem industrije najizraženije. Kao što je na Slici 3.12 vidljivo, za izradu ove karte je u obzir uzeta *buffer* zona vodonosnika od 3 km.

Karta na kojoj je prikaz raspodjele površine vodonosnika s kanalizacijskom mrežom i površine vodonosnika sa septičkim jamama je na Slici 3.13. Za izradu ove karte, uzeta je u

obzir dodatna *buffer* zona vodonosnika. Na karti (Slika 3.13) je jasno odijeljeno područje s kanalizacijskim sustavom od područja bez kanalizacijskog sustava. Veći dio površine zagrebačkog vodonosnika nema razvijenu kanalizacijsku mrežu. S obzirom da o svakoj pojedinoj septičkoj jami brinu vlasnici – građani, njima je dodijeljen veći težinski faktor i uzete su u obzir kao opasnije za vodonosni sustav (Tablica 3.2).

Karta farmi je napravljena jednako kao i karta industrijskih objekata. Na području zagrebačkog vodonosnog sustava ima 1174 farme. Na Slici 3.14 vidljivo je da se zone utjecaja svake pojedine farme višestruko preklapaju. O samim farmama nema nekih dodatnih informacija, poput njene veličine ili životinjske vrste koja se na njoj uzgaja, pa nije moguće utvrditi koliko se utjecaji pojedinih farmi razlikuju. Zbog toga je cijelom sloju farmi dodijeljen jednaki težinski faktor (Tablica 3.2).

#### **4.2. KARTA SPECIFIČNE RANJIVOSTI**

Kako bi se dobila najbolja verzija karte specifične ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava na dušikove spojeve, napravljeno je 15 različitih verzija završne karte. Vrijednosti dodijeljenih težinskih faktora vidljive su u Prilogu 1., a vrijednosti težinskih faktora za najbolju verziju karte vidljive su u Tablici 3.2 i u Prilogu 1.

Neke verzije karte su odmah odbačene, jer su uz modificiranu formulu za proračun ranjivosti, dale loše proračunate karte (iteracije IX, X, XII i XIII). Karte dobivene iteracijama IX i X (Prilog 6) nisu u obzir uzimale vrijednosti samih parametara, već su samo zbrojeni njihovi težinski faktori. Zbog toga su ove karte pod značajnim subjektivnim utjecajem, koji se dobiva tijekom dodjeljivanja težinskih faktora. Karte dobivene iteracijama XII i XIII (Prilog 8) pokazuju prevelik utjecaj određenog parametra odnosno u ovom slučaju izvora dušikovih spojeva. Ovo su karte kod kojih su sloju farmi i industrije dodane prevelike vrijednosti. U Prilogu 1 vidljivo je da je kod iteracije XII farmama dana težinska vrijednost 180, a industriji 20, dok je kod iteracije XIII farmama dan težinski faktor 90, a industriji je ostao 20. Zbog toga se na kartama jasno ocrta rub zajedničkog poligona farmi. Ovakvi visoki težinski faktori određeni su subjektivnom metodom određivanja aritmetičke sredine broja farmi u jednoj točki.

Naime, na *shapefile-u* farmi se odredilo da je prosječan broj farmi koji se nalaze na jednoj točki 30 te je taj broj pomnožen originalnim težinskim faktorom koji je dodijeljen svakoj farmi (6). Na taj je način dobiven broj 180. Isti je postupak napravljen i sa slojem industrije,

gdje je određeno da se preklapaju 2,4 *buffer-a* industrijskih objekata, to je pomnoženo težinskim faktorom 8 i zaokruženo na 20. Ovakve su karte pokazale da područje Grada Zagreba ima najmanju opasnost od onečišćenja dušikovim spojevima, što svakako nije točno. Isti je postupak napravljen s iteracijom XII i dobiven je isti rezultat, samo s manjim vrijednostima indeksa ranjivosti.

Ovakav rezultat ne odgovara prijašnjim istraživanjima. Prema Kovač et al. (2017a), vidljivo je da se značajne količine nitrata nalaze upravo na sjevernoj granici zagrebačkog vodonosnog sustava, odnosno u području Grada Zagreba, i na južnoj granici zagrebačkog vodonosnog sustava. Njihovi podaci odražavaju mjesta na kojima je već došlo do povišenja koncentracije nitrata (do 34 mg/l), te su takva mjesta ili mjesta uzvodno uzrok ulaska dušikovih spojeva u podzemnu vodu. Zbog tih razloga, gornje su četiri karte odbačene.

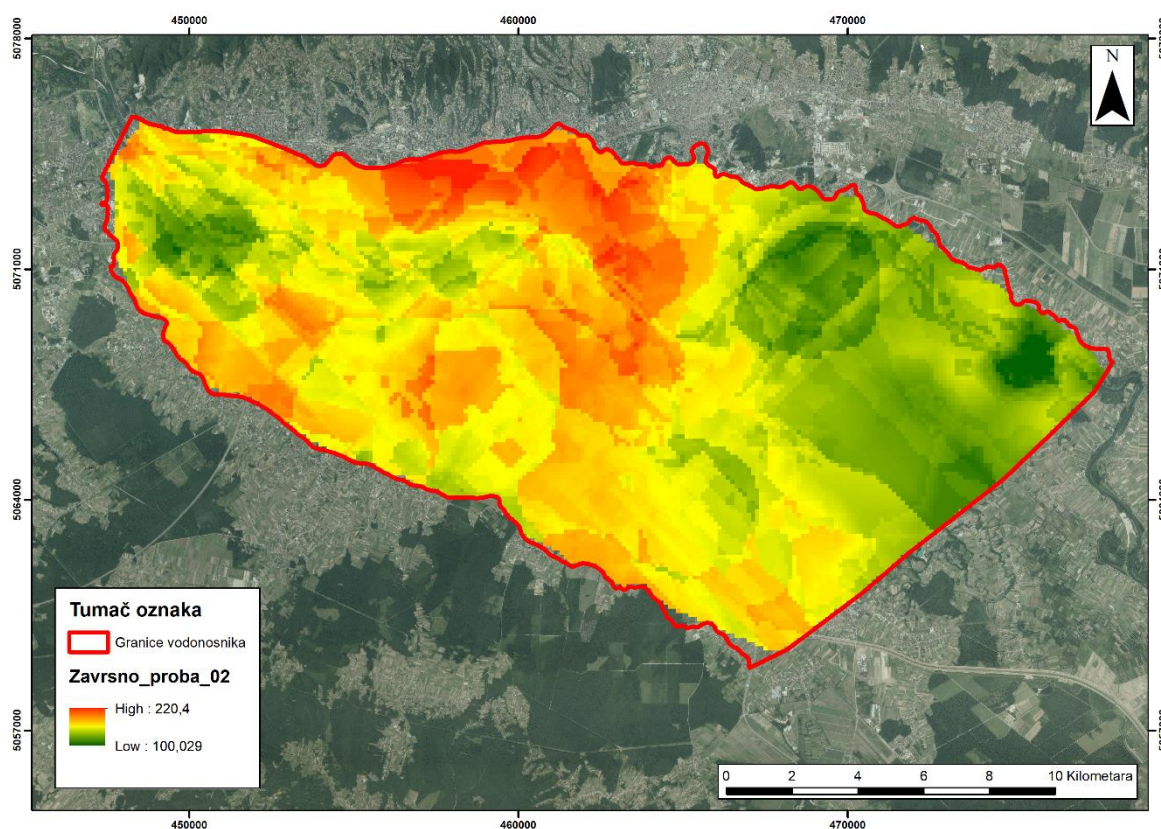
Karte dobivene iteracijama II, III, IV, V, VI, VII i VIII imaju smanjene težinske vrijednosti jednog ili više parametara, što je vidljivo u Prilogu 1, a promjene su označene crvenom bojom. Ove su karte također odbačene. Razlog tomu je što, iako pokazuju sličnost s podacima o koncentracijama nitrata (Kovač et al., 2017a), kod većine karata izostaju područja s najvišim zabilježenim koncentracijama nitrata. Drugim riječima, kod nekih karata značajno izostaje povišenje vrijednosti u južnom dijelu vodonosnika i ostaje samo ono u sjevernom, na području Grada Zagreba. Povišenje vrijednosti na području Grada Zagreba jako je izraženo, dok u ostalim dijelovima vodonosnika u potpunosti izostaje, ili ne pokazuje kontinuitet („Zavrsno3“, „Zavrsno4“, „Zavrsno6“ i „Zavrsno8“ – Prilog 3, 4 i 5).

Karta „Zavrsno2“ (Prilog 2) ima šire pojaseve s višim vrijednostima te se poprilično razlikuje od ostalih karata, jednako kao i karta „Zavrsno\_proba1“ (Prilog 7), dok karte „Zavrsno5“ (Prilog 4) i „Zavrsno7“ (Prilog 5) odgovaraju karti „Zavrsno\_proba“ (Prilog 2). Na obje karte, dobivene iteracijama V i VII, sniženi su pojedini faktori. U oba slučaja sniženi su faktori za temperaturu, međutim zbog i dalje visokih vrijednosti ovih slojeva, razlike nisu značajne u odnosu na kartu „Zavrsno\_proba“ (Prilog 2), odnosno iteraciju I (Prilog 1).

Općenito, karte „Zavrsno5“, „Zavrsno7“, „Zavrsno\_proba“ i „Zavrsno\_proba1“, uzete su kao karte koje najznačajnije odgovaraju onoj koju su dobili Kovač et al. (2017a). Međutim, razlog zbog čega su sve četiri karte odbačene je činjenica da u njima nisu uključeni svi slojevi. Kao što je vidljivo iz Priloga 1, nedostaju slojevi farmi i industrije. Kako bi se riješio taj problem izrađene su karte „Zavrsno\_proba\_12“ (Prilog 7) i „Zavrsno\_proba\_02“ (Slika 4.1, Prilog 9) te su uzete u užu izbor.



Razlika između ovih dviju karata je u sloju tla. Ovom sloju, na karti „Završno\_proba\_12“ dodijeljena je težinska vrijednost 10 za vodena tijela i urbane površine. Takav težinski faktor ima smisla ako se na ove površine gleda kao na mjesta s izostankom tla kao prirodnog pokrova vodonosnog sustava i svojevrsne barijere za prolaz onečišćenja. Međutim, ako se pogleda поближе karta na Slici 3.10, vidljivo je da su ova područja već uvrštena u više kategorije, odnosno u područja s većom mogućnosti onečišćenja. Zbog toga, nije bilo potrebe ponovno dodavati tim područjima dodatne težinske vrijednosti zbog izostanka tla, obzirom da je na kartama koje se nalaze na Slici 3.3 i 3.16 D bitno jedino kako vrsta tla utječe na prodor onečišćenja, te je zbog toga karta „Završno\_proba\_02“ (Slika 4.1, Prilog 9) bolji izbor.



*Slika 4.1. Karta raspodjele indeksa ranjivosti dobivena iteracijom XV*

Drugi razlog zbog kojeg je karta „Završno\_proba\_02“ (Slika 4.1, Prilog 9) vjerodostojnija jest kontinuirana zona s povišenim vrijednostima u južnom dijelu vodonosnog sustava. Vidljivo je da je cijela jugozapadna i južna zona obuhvaćena značajnim povišenjem indeksa ranjivosti. Također je vidljiva i središnja zelena zona, koja prati rijeku Savu, a odgovara zoni sniženih vrijednosti koncentracija nitrata kod Kovač et al. (2017a).

Ono što značajno odstupa od istraživanja Kovač et al. (2017a), jest vidljiva crvena zona koja se na istočnom dijelu Grada Zagreba spušta s desne obale Save na lijevu. Na taj način spaja povišene vrijednosti na lijevoj i desnoj obali rijeke Save i čini kontinuiranu zonu. Ovakva pojava rezultat je objekata koji se nalaze na tom području. Naime, prema karti pokrova (Slika 3.10), upravo je na tom mjestu dodijeljena najveća kategorija i najveći težinski faktor. Za to je mjesto u atributnoj tablici napisano da je odlagalište otpada Jakuševac-Prudinec, koje je izvor različitih onečišćivala koja mogu ući u podzemnu vodu.

Valja spomenuti da na prethodno prikazanoj karti, područje grada Zagreba predstavlja dio s najvišim vrijednostima indeksa ranjivosti. Razlog tomu vidljiv je u gotovo svakom korištenom sloju: vidljivo je da se na tom području nalazi najveći dio industrijskih objekata, vrijednosti koncentracija otopljenog kisika također su u tom dijelu više. Prema podijeli pokrova, područje grada Zagreba uvršteno je u 3. kategoriju, a i zabilježene temperature su najviše upravo na ovom području.

Naglo sniženje indeksa ranjivosti, istočno od povišenja prouzročenih odlagalištem otpada Jakuševac-Prudinec, prema korištenim slojevima može se objasniti značajnim sniženjem koncentracija otopljenog kisika. Ovakvo sniženje koncentracija kisika, može se objasniti produbljivanjem vodonosnika koje su potvrdili Bačani & Posavec (2014.). Kod njih je vidljiv značajan pad u vrijednostima izostrata podine prvog i drugog vodonosnog sloja u odnosu na izostrate podine pokrova. Na ovom su području i velike površine pod 1. i 2. kategorijom prema podijeli pokrova, zbog čega su i dodijeljene niže vrijednosti težinskih faktora.

Uz jugozapadnu i južnu granicu vodonosnog sustava vidljive su više vrijednosti indeksa ranjivosti. Ovakav raspored može se objasniti zbog visokih vrijednosti koncentracija otopljenog kisika, dok su preostale vrijednosti srednje do niske, zbog čega ovo područje nema vrijednosti indeksa ranjivosti kao Grad Zagreb. Ono što je na ovom području karakteristično, jest lokalno povišenje vrijednosti indeksa ranjivosti, gotovo kružnog oblika, a nalazi se zapadno od izvorišta Mala Mlaka. Ovo povišenje vrijednosti je rezultat najviših vrijednosti koncentracija kisika koje podižu vrijednosti indeksa ranjivosti. Na ovome se mjestu nalazi područje s najdebljom nesaturiranom zonom, koje se djelomično preklapa s područjem visokih koncentracija kisika, isto tako, tu su i najniže vrijednosti temperature. Zbog čega ovo povišenje najznačajnije uzrokuju koncentracije otopljenog kisika.

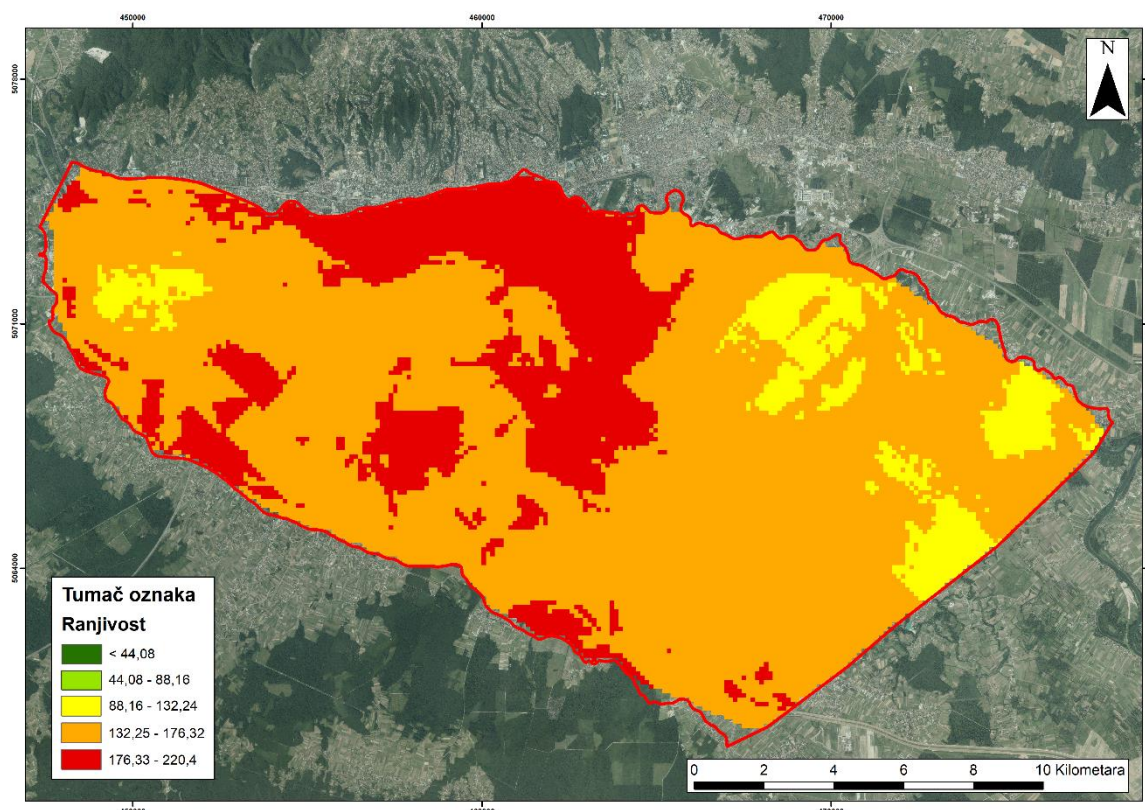
Također je bitno spomenuti i značajno sniženje vrijednosti indeksa ranjivosti na zapadu sustava. Na ovom su mjestu vrijednosti temperature podzemne vode najniže. Moguće je vidjeti sve četiri kategorije pokrova, relativno visoke vrijednosti koncentracija otopljenog kisika (4 – 6 mg/l), a vrijednosti nesaturirane zone padaju u srednju kategoriju, dok je tlu dodijeljena najviša kategorija. Dakle, ovo sniženje indeksa ranjivosti, mora biti prouzročeno najnižim vrijednostima temperature, koje značajno odskaku od ostatka vodonosnog sloja.

Također, prema gore navedenom vidljivo je da farme, septičke jame i kanalizacijska mreža zbog svog načina prostiranja na velikim površinama, gotovo u svakoj točki dodaju vrijednosti indeksu ranjivosti, zbog čega njihov utjecaj zasebno nije uočen na karti, ali značajno pridonose ukupnoj vrijednosti indeksa ranjivosti. Zbog prethodno navedenih razloga, karta „Završno\_proba\_02“ dobivena iteracijom XV uzeta je za daljnju podjelu prema stupnjevima ranjivosti.

Kako bi se iz karte raspodjele indeksa ranjivosti dobila karta ranjivosti vodonosnog sustava, napravljena je podjela u pet stupnjeva. Od ukupnog zbroja težinskih faktora, koji na karti „Završno\_proba\_02“ (Slika 4.1) ili karti indeksa ranjivosti (Prilog 9) iznosi 220,4 uzeto je da svakih 20% maksimalne vrijednosti predstavlja novi stupanj ranjivosti:

- Vrlo niska (<44,08)
- Niska (44,08 – 88,16)
- Umjerena (88,16 – 132,24)
- Visoka (132,24 – 176,32)
- Vrlo visoka (176,32 – 220,4)





*Slika 4.2. Karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava obzirom na dušikove spojeve podijeljena u pet kategorija.*

Karta ranjivosti vidljiva na Slici 4.2, može se vidjeti i u Prilogu 10. Vidljivo je da na području zagrebačkog vodonosnog sustava izostaju prve dvije kategorije, odnosno vrlo niska i niska ranjivost. Najmanji indeksi ranjivosti na karti iznose 100,03, što već pripada grupi umjerene ranjivosti. Prema prethodno objašnjenim dijelovima sniženih i povišenih vrijednosti indeksa ranjivosti, vidljivo je da su neke podudarnosti ostale i na ovoj karti. Tako su mjesta koja imaju najveća sniženja indeksa ranjivosti na istoku vodonosnog sustava i ono na zapadu svrstana u zasebnu kategoriju umjerene ranjivosti. Ovo su područja, koja su na karti na Slici 4.1, prikazana najtamnijim nijansama zelene boje.

Vrlo visokoj ranjivosti pripadaju zone koje su na karti indeksa ranjivosti (Prilog 9) prikazane crveno-narančastom ili crvenom bojom. To je svakako područje grada Zagreba koje i na karti indeksa ranjivosti odskaka od ostalih područja sa svojim vrijednostima. Uz to, tu je i područje s izrazito visokim vrijednostima koncentracija otopljenog kisika koje se nalazi zapadno od izvorišta Mala Mlaka (Bačani & Posavec, 2014), te područje na kojemu visoki indeksi ranjivosti prelaze s lijeve obale Save na desnu i to je područje na kojemu se nalazi odlagalište otpada Jakuševac-Prudinec (CLC2012; HAOP 2018a). Vrlo visoka ranjivost

nalazi se i uz samu južnu granicu vodonosnog područja. Preostali dijelovi vodonosnog područja, koji su na Slici 4.1, prikazani svijetlozelenom bojom, žutom bojom ili svijetlim nijansama narančaste boje, pripadaju područjima visoke ranjivosti na dušikove spojeve.

Ukoliko se pogleda поближе svaki sloj i maksimalne vrijednosti svakog sloja, može se vidjeti da zbroj maksimalnih vrijednosti svih slojeva ne iznosi 220,4, već 274,04. Razlog zbog kojega je vrijednost 220,4 uzeta kao maksimalna vrijednost za izradu karte ranjivosti je sljedeći: ukoliko bi se od broja 274,04 određivali intervali za pojedini stupanj ranjivosti na isti način kao što je napravljeno za vrijednost 220,4, tada bi intervali glasili:  $<54,81$ ;  $54,81 - 109,62$ ;  $109,62 - 164,42$ ;  $164,42 - 219,23$ ;  $219,23 - 274,04$ . Ovakvi intervali bi u potpunosti isključili vrlo nisku ranjivost, te bi se vrlo visoka ranjivost pojavila u nekoliko točaka na samom sjeveru grada. U istočnom dijelu vodonosnika, pojavila bi se niska ranjivost. Ono što bi karakteristično bilo kroz većinu površine vodonosnog sustava jesu umjerena i visoka ranjivost. Ovakva bi raspodjela ranjivosti bila nerealna, jer između maksimalne moguće vrijednosti i maksimalne dobivene vrijednosti na karti je razlika 53,64, što čini gotovo jedan cijeli interval kritičnih vrijednosti koje izostaju s karte. Iz toga je razloga u obzir uzeta karta na Slici 4.2, jer pokazuje najgori mogući slučaj ranjivosti dobiven ovom metodom.

## 5. ZAKLJUČAK

Područje zagrebačkog vodonosnika zbog svoje važnosti, kao strateških zaliha podzemne vode Republike Hrvatske, bilo je dijelom brojnih istraživanja. Istraživani su potencijalni onečišćivači, ali i njihovi izvori. Najviše je dostupnih podataka, ali i istraživanja napravljeno obzirom na dušikove spojeve. Zbog toga što ovo područje predstavlja izvor vode za vodoopskrbu više od milijun ljudi koji ovdje žive, važno ga je što bolje zaštititi. Iz tog je razloga, napravljena karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava s obzirom na dušikove spojeve.

Tijekom izrade karte razmatrani su brojni utjecaji i uzročnici pojave dušikovih spojeva u podzemnim vodama. Na temelju prethodnih istraživanja i saznanja neki parametri su odbačeni, a u daljnje razmatranje uzeti su: hidraulička vodljivost, tlo, debljina nesaturirane zone, temperatura, otopljeni kisik, utjecaj pokrova, industrija, kanalizacija i septičke jame te farme. Prilagodbom i obradom navedenih slojeva u softveru *ArcGIS Desktop* (ESRI, 2018b) te korištenjem dodatnih alata i ekstenzija, dobiveni su slojevi koji su korišteni za izradu završne karte. Posebno se dobrom pokazala ekstenzija *Geostatistical Analyst* kojom su rađene interpolacije slojeva kisika i temperature, a koja omogućuje detaljnije upravljanje ulaznim podacima, kako bi rezultatna karta bila preciznija i vjerodostojnija.

Rezultat istraživanja i rada u softveru *ArcGIS Desktop* (ESRI, 2018b) jest karta specifične ranjivosti zagrebačkog vodonosnika. Karta specifične ranjivosti zagrebačkog vodonosnika je karta indeksa ranjivosti podijeljena u pet kategorija ranjivosti: vrlo visoku, visoku, umjerenu, nisku i vrlo nisku ranjivost. Na toj je karti vidljivo da najniže zabilježene vrijednosti na karti indeksa ranjivosti spadaju u umjerenu ranjivost, a niska i vrlo niska ranjivost u potpunosti izostaju. Vrlo visoka ranjivost zabilježena je na području Grada Zagreba na desnoj obali Save, odlagališta otpada Prudinec, zapadno od izvorišta Mala Mlaka te uz jugozapadnu i južnu granicu vodonosnog područja. Na većini površine istraživanog područja prevladava visoka ranjivost.

Prema navedenom, može se vidjeti da prirodni parametri koji su uzeti u razmatranje, a to su: tlo, hidraulička vodljivost, otopljeni kisik i debljina nesaturirane zone, zbog svojih vrijednosti nisu najpovoljniji za očuvanje podzemne vode. Naime, visoke vrijednosti hidrauličke vodljivosti, male vrijednosti debljina nesaturirane zone, visoke vrijednosti otopljenog kisika, a i propusna tla, ne mogu zaštititi podzemni vodonosni sustav. S druge su

strane tu poluprirodni parametri, koji su već alterirani radom čovjeka (temperatura je povišena u području Zagreba, a pokrov vodonosnika značajno izmijenjen). Na kraju valja spomenuti i razne izvore dušikovih spojeva na području zagrebačkog vodonosnog sustava, koji nikako ne doprinose zaštiti sustava. Iz svega gore navedenog, ispravno je zaključiti da područje zagrebačkog vodonosnog sustava generalno predstavlja područje visoke ranjivosti, čije će se karakteristike nastaviti pogoršavati, ukoliko se ne poduzmu ozbiljne mjere njegove zaštite. U svakom slučaju, potrebna su još detaljnija istraživanja gore navedenih parametara i njihovih utjecaja na procese u vodonosnom sustavu, kao i istraživanja vezana uz njihovo zajedničko djelovanje na procese u podzemnoj vodi zagrebačkog vodonosnog područja.

## 6. LITERATURA

- ALMASRI, M.N., 2007. Nitrate contamination of groundwater: A conceptual management framework. *Environmental Impact Assessment Review*, 27, 220 – 242 str.
- ALLER, L.T., BENNETT, T., LEHR, J.H., PETTY, R.J. & HACKETT, G. (1987): DRASTIC. A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings. U.S. Environment Protection Agency /600/2-87/035, 455 str. Washington D.C., Berlin/Heidelberg.
- BAČANI, A., POSAVEC, K., NAKIĆ, Z., PERKOVIĆ, D., MILETIĆ, P., HEINRICH-MILETIĆ, M., PARLOV, J., BAZIJANEC, M., 2005. Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta grada Zagreba, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- BAČANI, A. & POSAVEC, K., 2009. Elaborat zaštitnih zona vodocrpilišta Velika Gorica. Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb. 77 p.
- BAČANI, A. & POSAVEC, K., 2014. Elaborat o zonama zaštite izvorišta Grada Zagreba, projektni zadatak. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, 222 str.
- BALDERACCHI, M., BENOIT, P., CAMBIER, P., EKLO, O.M., GARGINI, A., GEMITZI, A., GUREL, M., KLØVE, B., NAKIĆ, Z., PREDAA, E., RUŽIČIĆ, S., WACHNIEW, P., TREVISAN, M., 2012. Groundwater pollution and quality monitoring approaches at the European level. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 43, 323 – 408 str.
- BASCH, O., 1980. Tumač OGK 1:100 000 za list Ivanić-Grad L33 – 81. *Savezni geološki zavod, Beograd*, 62 str.
- BASCH, O., 1981. Osnovna geološka karta SFRJ, list Ivanić-Grad, L33-57. Geološki zavod Zagreb, OOUR za geologiju i paleontologiju. Redakcija i izdanje Saveznog geološkog zavoda Beograd, 1981. godine
- BHADRA, B.K., PATHAK, S., SHARMA, J.R., 2013. Impact of industrial effluents on groundwater around Pali City, Rajasthan using field and satellite data. *Journal Geological Society of India*, vol. 82, 675 – 691 str.

BIONDIĆ, B., BRKIĆ, Ž., BIONDIĆ, R., SINGER, D., 1996. Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske. Hidrogeologija. I. faza. Arhiv Instituta za geološka istraživanja, Zagreb.

BIONDIĆ, B. & BRKIĆ, Ž., 2001. Vodnogospodarska osnova Republike Hrvatske – Podzemne vode. Arhiv Instituta za geološka istraživanja, Zagreb.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY (BTS), 2008. Groundwater Information Sheet – The Impact of Industrial Activity, 6 str.

BRKIĆ, T. & BIONDIĆ, B., 2000.: Savski vodonosnik i njegove hidrogeološke značajke. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima. Zbornik radova, Okrugli stol, Slavonski Brod.

BOGUNOVIĆ, M., VIDAČEK, Ž., RACZ, Z., HUSNJAK, S., SRAKA, M., 1996. Namjenska pedološka karta RH mjerila 1:300.000. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

BUMBAK, L., 2015. Izrada karata prosječnih godišnjih koncentracija nitrata pomoću metoda interpolacije za priljevno područje „Mala Mlaka“. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 53 str.

CVITA, M. & DE MAIO, M., 1997. SINTACS. Un sistema parametrico per la valutazione e la cartografia della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento. Metodologia and Automatizzazione, Pitagora Editrice, vol 60, 191 str.

DELLEUR, J.W., 2007. The Handbook of groundwater engineering, Second Edition. *Taylor & Francis Group*, 1342 str.

DIMKIĆ, M.A., BRAUCH, H.J., KAVANAUGH, M., 2008. Groundwater management in large river basins. IWA Publishing, 706 str.

DOMENICO, P.A. & SCHWARTZ, F.W., 1997. Physical and Chemical Hydrogeology. Second edition. *John Wiley & Sons, Inc.*, 554 str.

EARLS, J. & DIXON, B., 2007. Spatial interpolation of rainfall data using ArcGIS: A comparative study. *Research Gate*, 10 str.

FAO, 2006. Guidelines for Soil Description, 4th edition. FAO, Rome, 97 str.



FEIGL, Ž., 2016. Kakvoća podzemne vode zagrebačkog vodonosnika. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 66 str.

HERRERA ENVIRONMENTAL CONSULTANTS, Inc. FOR WASHINGTON STATE DEPARTMENT OF TRANSPORT, 2007. Untreated Highway Runoff in Western Washington. *White Paper*, 66 str.

HATZOPOULOS, N., 2002. Geographic information system (GIS) in water management. *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Forum "Integrated Water Management: The key to sustainable water resources*, 8 str.

HOFSTRA, N., HAYLOCK, M., NEW, M., JONES, P., FREI, C., 2008. Comparison of six methods for interpolation of daily, European climate data. *Journal of geophysical research*, 113, 19 str.

HUSNJAK, S., 2012. Sistematika tala Hrvatske. Rukopis udžbenika. Agronomski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 289 str.

KIRETA, D., 2014. Procjena nesaturirane hidrauličke vodljivosti na lokaciji Kosnica, Zagreb. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 43 str.

KOVAČ, Z., 2017. Podrijetlo nitrata u podzemnoj vodi zagrebačkoga aluvijalnoga vodonosnika. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 255 str.

<sup>a</sup>KOVAČ, Z., CVETKOVIĆ, M., PARLOV, J., 2017. Gaussian simulation of nitrate concentration distribution in the Zagreb aquifer. *Journal of Maps*, 13/2, str. 727 – 732.

<sup>b</sup>KOVAČ, Z., NAKIĆ, Z., PAVLIĆ, K., 2017. Influence of groundwater quality indicators on nitrate concentrations in the Zagreb aquifer system. *Geologia Croatica*, 70/2, str. 93 – 103.

KOVAČ, Z., NAKIĆ, Z., BAREŠIĆ, J., PARLOV, J., 2018. Nitrate origin in the Zagreb Aquifer System. *Geofluids*, 2018, 15 str.

LEE, M.S., LEE, K.K., HYUN, Y., CLEMENT, T.P., HAMILTON, D., 2006. Nitrogen transformation and transport modelling in groundwater aquifers. *Ecological Modelling*, 192, str. 143 – 159.

LI, S.L., LIU, C.Q., LANG, Y.C., ZHAO, Z.Q., ZHOU, Z.H., 2010. Tracing the sources of nitrate in karstic groundwater in Zunyi, Southwest China: a combined nitrogen isotope and water chemistry approach. *Environmental Earth Sciences*, 60, str 1415 – 1423.

LOBOREC J., 2013. Procjena rizika od onečišćenja podzemnih voda u kršu na području sliva izvora Jadro i Žrnovnice. Doktorski rad, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 212 str.

LONČARIĆ, Z., RASTIJA, D., BALIČEVIĆ, R., KARALIĆ, K., POPOVIĆ, B., IVEZIĆ, V., 2014. Plodnost i opterećenost tala u pograničnome području. Poljoprivredni fakultet, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, 74 str.

MARKOVIĆ, T., BRKIĆ, Ž., LARVA, O., 2013. Using hydrochemical data and modelling to enhance the knowledge of groundwater flow and quality in an alluvial aquifer of Zagreb, Croatia. *Science of the Total Environment*, 458 – 460, str. 508 – 516.

NAKIĆ, Z., 2015. Zaštita podzemnih voda. Skripta. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 133 str.

NAKIĆ, Z., RUŽIČIĆ, S., POSAVEC, K., MILEUSNIĆ, M., PARLOV, J., BAČANI, A., DURN, G., 2013. Conceptual model for groundwater status and risk assessment – case study of the Zagreb aquifer system. *Geologia Croatica*, 66/1, str 55 – 76.

NARODNE NOVINE 91/2008., Strategija upravljanja vodama Republike Hrvatske.

POROPAT, M., 2016. Zalihe podzemne vode Zagrebačkog vodonosnika. Diplomski rad. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 22 str.

POSAVEC, K., 2006. Identifikacija i prognoza minimalnih razina podzemne vode zagrebačkoga aluvijalnog vodonosnika modelima recesijskih krivulja. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu.

ROCHE, J.R., LEDGARD, S.F., SPROSEN, M.S., LINDSEY, S.B., PENNO, J.W., HORAN, B., MACDONALD, K.A. 2016. Increased stocking rate and associated strategic dry-off decision rules reduced the amount of nitrate-N leached under grazing. *J. Dairy Sci.*, 99, str 5916 – 5925.

RUŽIČIĆ, S., 2013. Model transporta potencijalno toksičnih elemenata kroz nesaturiranu zonu na području regionalnog vodocrpilišta Kosnica. Doktorska disertacija. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Sveučilište u Zagrebu. 183 str.

RUŽIČIĆ, S., MILEUSNIĆ, M., POSAVEC, K., 2012. Building conceptual and mathematical model for water flow and solute transport in the unsaturated zone at Kosnica site. *Geologia Croatica*, 25, str. 21 – 31.

SHANKAR, B.S., BALASUBRAMANYA, N., MARUTHESHA REDDY, M.T., 2008. Impact of industrialization on groundwater quality – a case study of Peenya industrial area, Bangalore, India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 142, 263 – 268 str.

SLUITER, R., 2009. Interpolation methods for climate data. *Research Gate*, 29 str.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A., 1972. Tumač OGK 1:100 000 za list Zagreb L33 – 80. *Savezni geološki zavod, Beograd*, 76 str.

ŠIKIĆ, K., BASCH, O., ŠIMUNIĆ, A., 1972. Osnovna geološka karta SFRJ, list Zagreb, L38-68. Institut za geološka istraživanja Zagreb. Redakcija i izdanje Saveznog geološkog zavoda Beograd, 1977. godine

URUMOVIĆ, K. & MIHELČIĆ D., 2000.: Podzemne vode savskoga vodonosnika. Hidrologija i vodni resursi Save u novim uvjetima. Zbornik radova, Okrugli stol, Slavonski Brod

VELIĆ, J. & SAFTIĆ, B., 1991. Subsurface spreading and facies characteristics of middle Pleistocene deposits between Zaprešić and Samobor. *Geološki vjesnik*, 44, 69 – 82 str.

VELIĆ, J. & DURN, G., 1993. Alternating Lacustrine-Marsh Sedimentation and Subaerial Exposure Phases during Quaternary: Prečko, Zagreb, Croatia. *Geologia Croatica*, vol. 46, no. 1, p. 71–90.

VELIĆ, J., SAFTIĆ, B., MALVIĆ, T., 1999. Lithologic Composition and Stratigraphy of Quaternary Sediments in the Area of the “Jakuševac” Waste Depository (Zagreb, Northern Croatia). *Geologia Croatica*, vol. 52, no. 2, p. 119–130.

## INTERNET IZVORI

(DGU, 2018): Geoportal. URL: <http://geoportal.dgu.hr/wms>, (12.11.2018.)

(<sup>a</sup>HAOP, 2018): CORINE Land Cover Hrvatska 2012 WFS sloj. URL: <http://servisi.azo.hr/tlo/wms>, (12.11.2018.)

(<sup>b</sup>HAOP, 2018): Registar postrojenja u kojima je utvrđena prisutnost opasnih tvari, WFS sloj. URL: <http://envi-portal.azo.hr/> (12.11.2018.)

(<sup>a</sup>ESRI, 2018): ArcGIS Resources. URL: <http://resources.arcgis.com/en/help/>, (12.11.2018.)

(<sup>b</sup>ESRI, 2018): ArcGIS Desktop. URL: <https://www.esri.com/en-us/arcgis/trial>, (12.11.2018.)

(<sup>a</sup>GOOGLE, 2018): Google Earth Pro. URL: <https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>, (12.11.2018.)

(<sup>b</sup>GOOGLE, 2018): Google Earth Engine (Timelapse). URL: <https://earthengine.google.com/timelapse/>, (12.11.2018.)

ET SpatialTechniques (2018): ET Geowizards. URL: <https://www.ian-ko.com/Downloads.html>, (12.11.2018.)

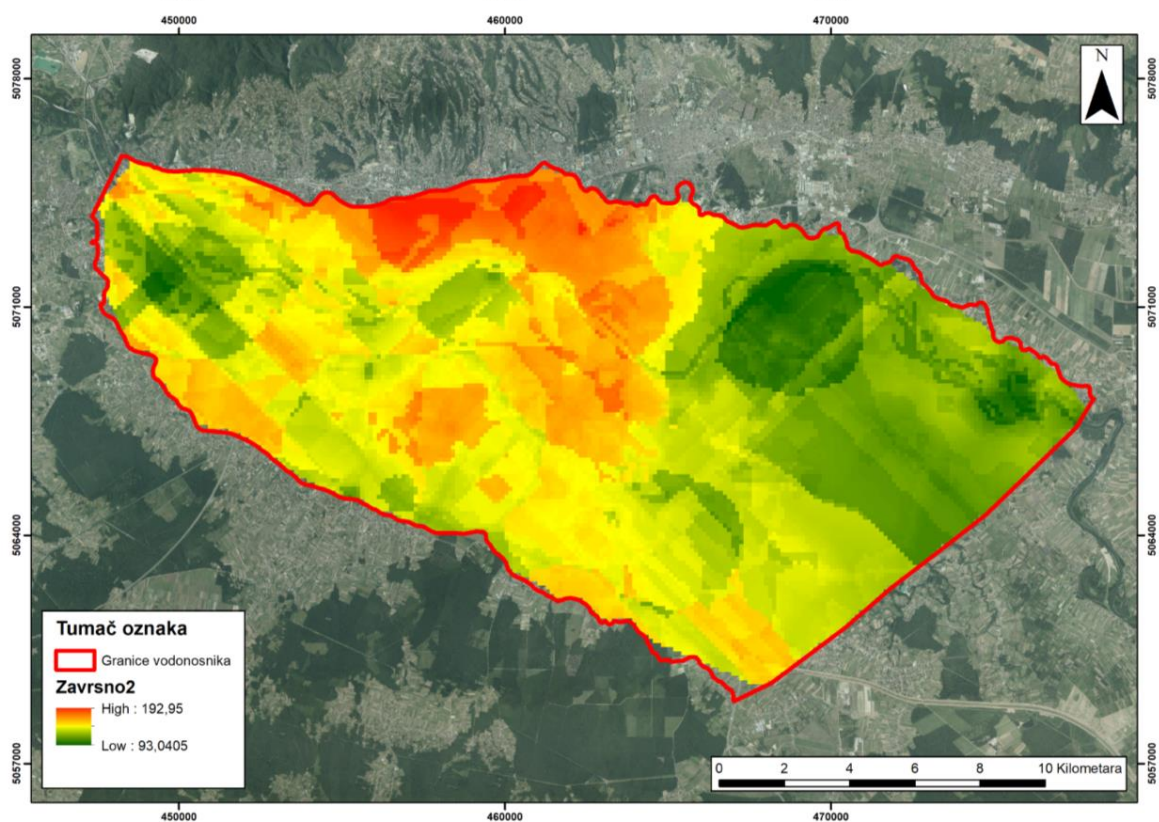
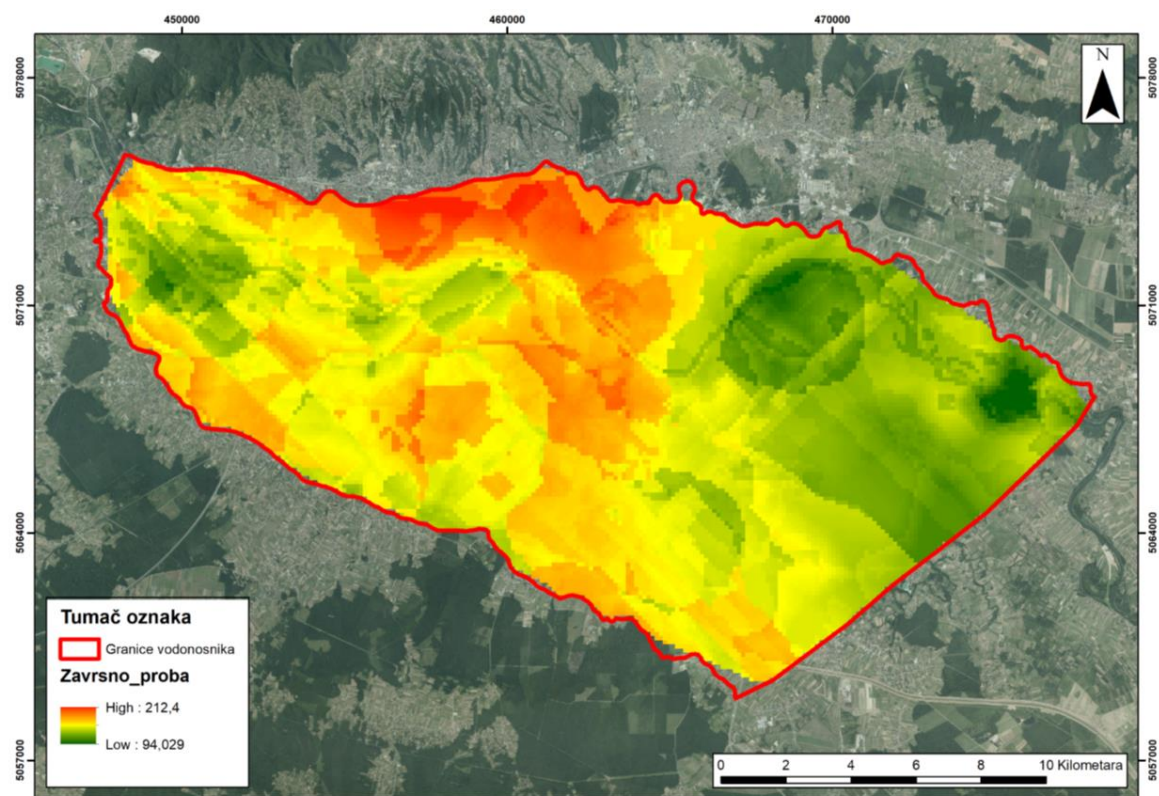
## **PRILOZI**



Prilog 1. Prikaz svih iteracija napravljenih kako bi se odredila najbolja završna karta za područje zagrebačkog vodonosnog sustava (crvenom bojom označeni su težinski faktori koji su mijenjani)

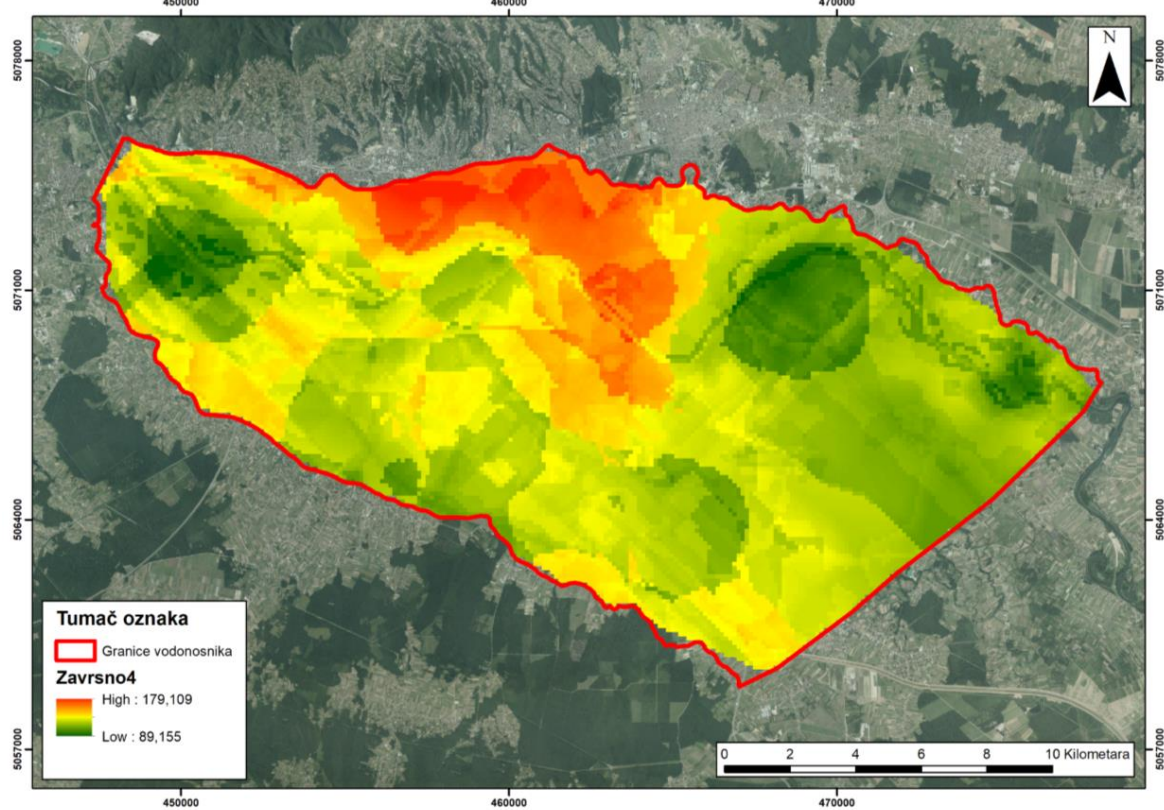
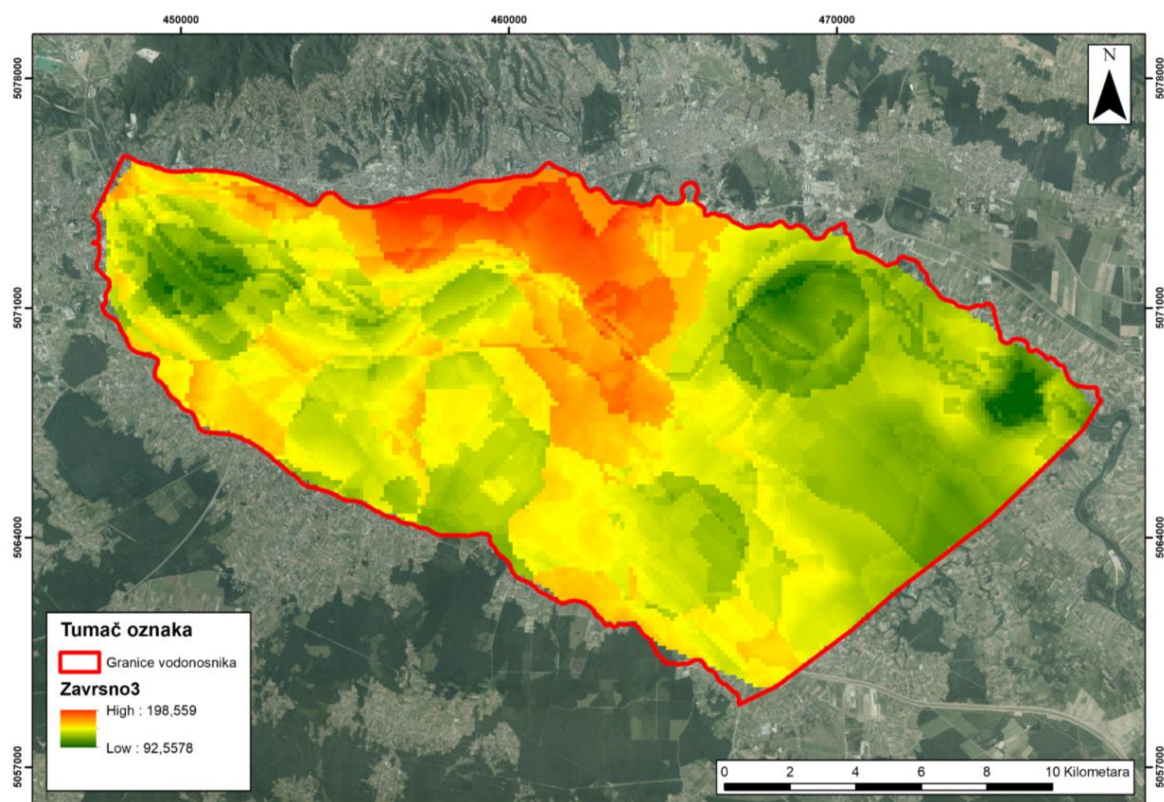
Proračun ranjivosti																		
			I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.	XIII.	XIV.	XV.	
		Kategorija	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	n	
Prirodni parametri	Tlo (S)	urbane površine i vodena tijela	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	0	10	0	
		aluvijalna	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
		euterično smeđe tlo i močvarno	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
		pseudoglej	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
	Debljina nesaturirane zone (NZ/m)	<0	10	5	10	5	10	10	5	5	10	5	10	10	10	10	10	10
		0 - 2	8	4	8	4	8	8	4	4	8	4	8	8	8	8	8	8
		2 - 5	6	3	6	3	6	6	3	3	6	3	6	6	6	6	6	6
		5 - 10	4	2	4	2	4	4	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4
		≥10	2	1	2	1	2	2	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2
	Hidraulička vodljivost (K/m/dan)	50 - 300	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
		300 -1000	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
		>1000	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
	Kisik (O/mg/l)	0,472 - 1,000	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
		1,001 - 2,000	3	3	2	2	3	2	3	2	3	2	3	3	3	3	3	3
		2,001 - 4,000	5	5	3	3	5	3	5	3	5	3	5	5	5	5	5	5
4,001 -6,000		7	7	4	4	7	4	7	4	7	4	7	7	7	7	7	7	
6,001 - 7,183		9	9	5	5	9	5	9	5	9	5	9	9	9	9	9	9	
Poluprirodni parametri	Temperatura (T/°C)	11,92 - 12,52	4	4	4	4	2	2	2	2	4	2	4	4	4	4	4	4
		12,53 - 13,12	5	5	5	5	3	3	3	3	5	3	5	5	5	5	5	5
		13,13 - 13,72	6	6	6	6	4	4	4	4	6	4	6	6	6	6	6	6
		13,73 - 14,32	7	7	7	7	5	5	5	5	7	5	7	7	7	7	7	7
		14,33 - 14,92	8	8	8	8	6	6	6	6	8	6	8	8	8	8	8	8
	Pokrov (C)	1. razina	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
		2. razina	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
		3. razina	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6
		4. razina	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
Izvori dušičnih spojeva	Kanalizacija/septičke jame	Kanalizacija (K)	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	
	Septičke jame (SJ)	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	
	Farme (F)	Cijeli sloj	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	180	90	6	6	
	Industrija (I)	Cijeli sloj	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	20	20	8	8	
NAZIV KARTE			Završno_proba	Završno2	Završno3	Završno4	Završno5	Završno6	Završno7	Završno8	Završno9	Završno10	Završno_proba1	Završno_sve	Završno_sve1	Završno_proba_1 2	Završno_proba_0 2	

*Prilog 2. Prikaz karata indeksa ranjivosti s obzirom na iteracije I i II*



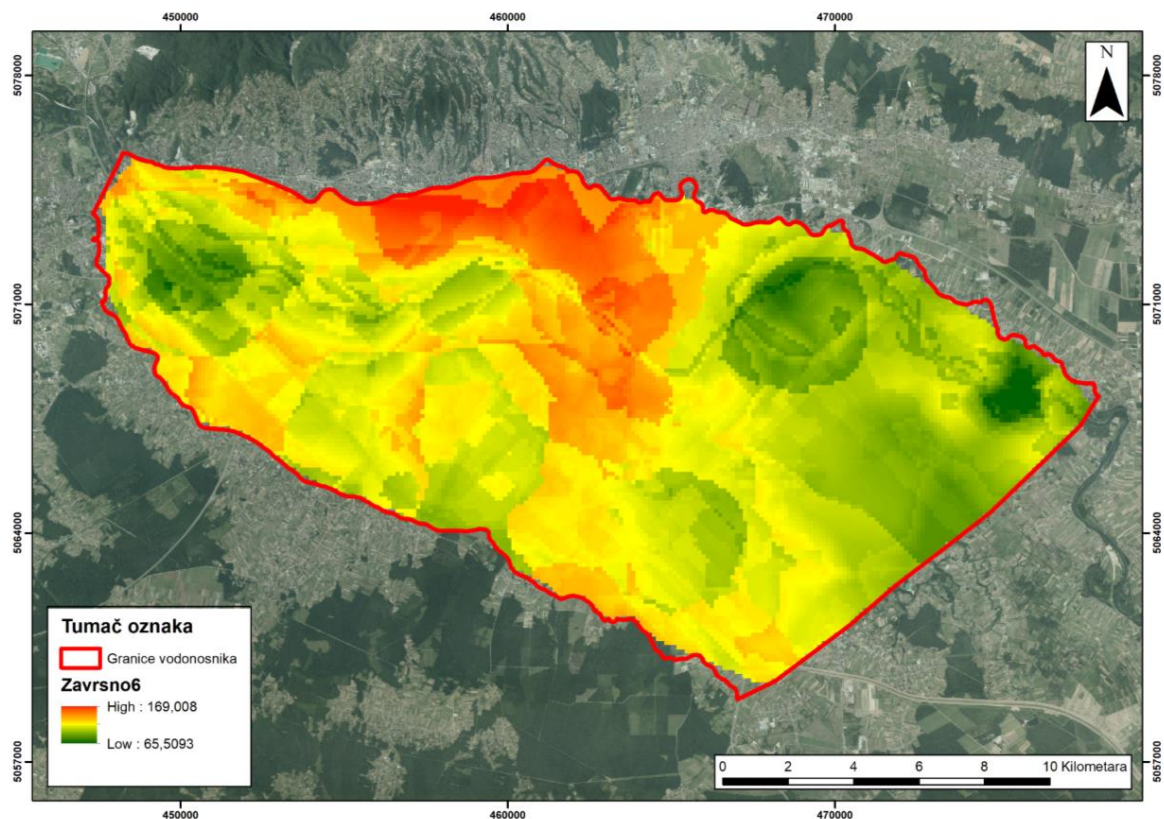
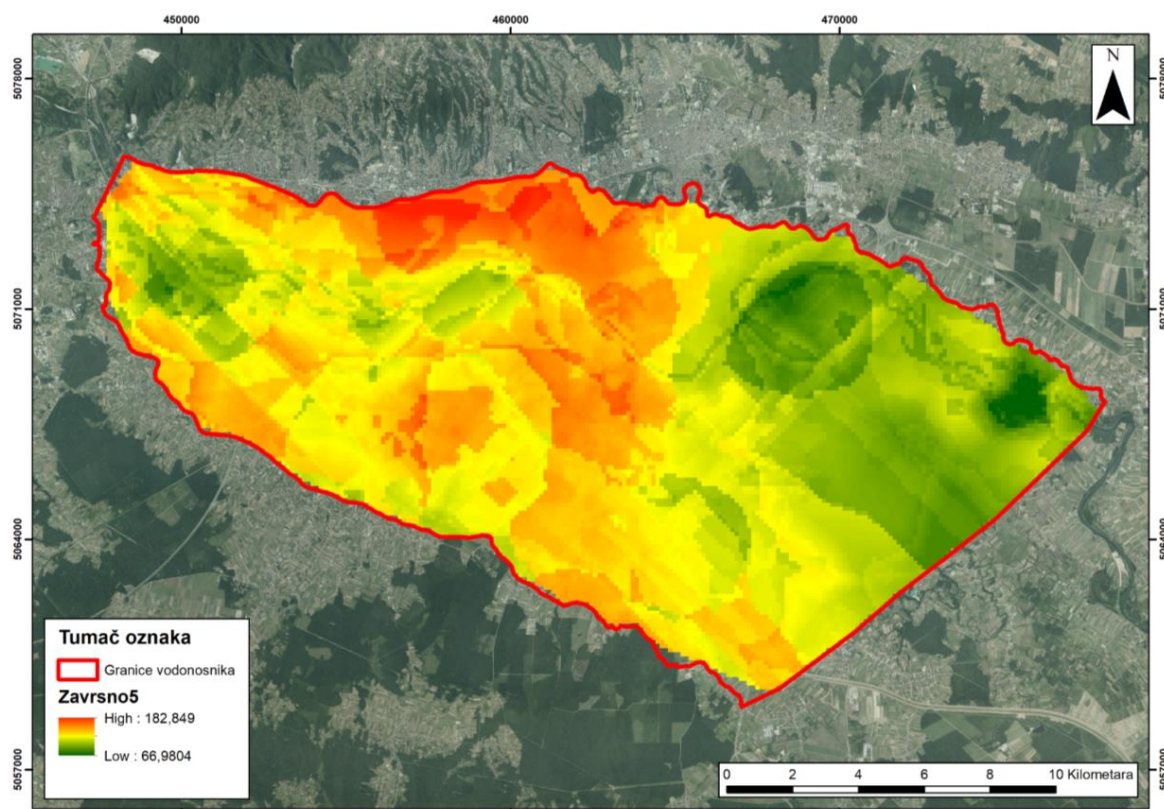


*Prilog 3. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama III i IV*



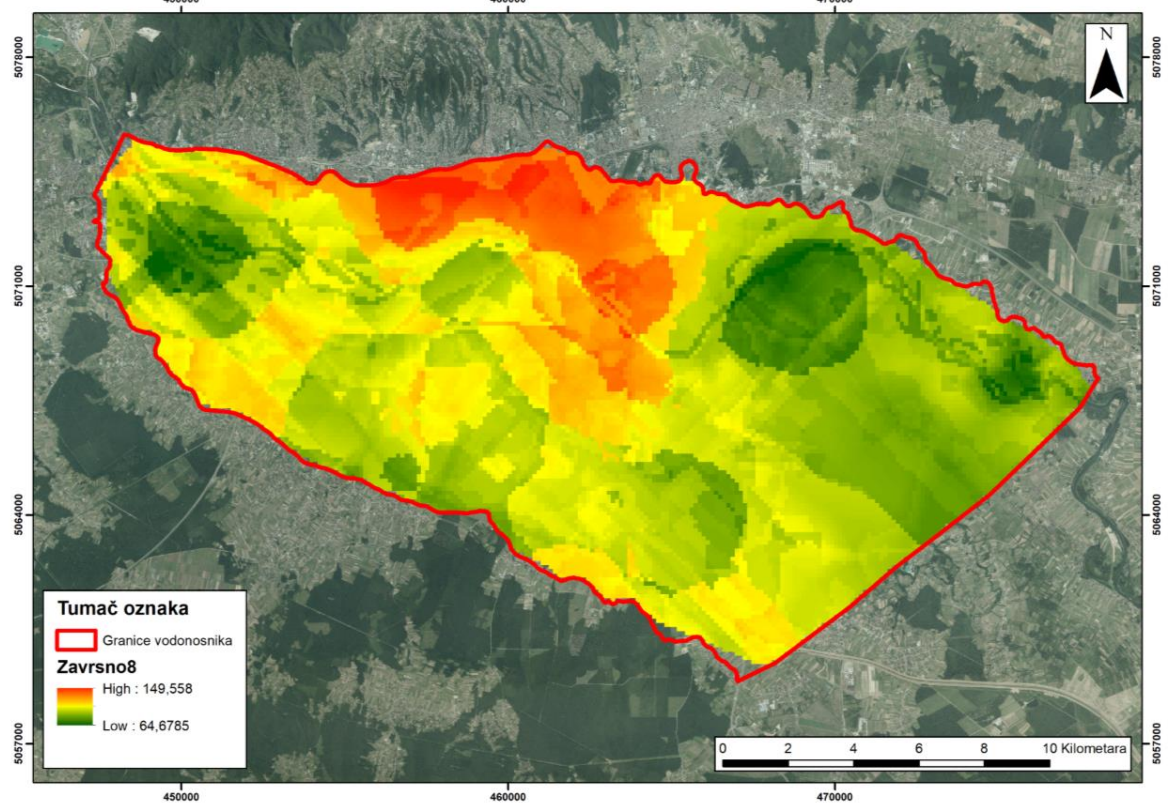
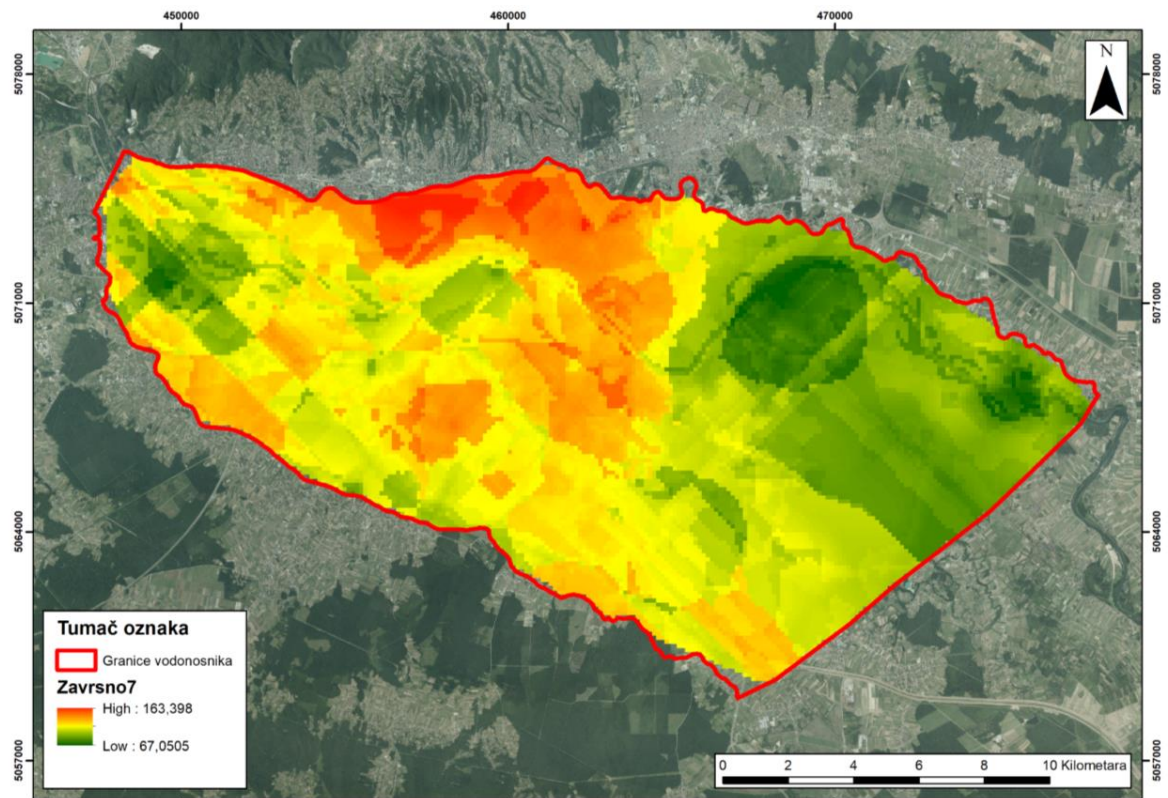


*Prilog 4. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama V i VI*



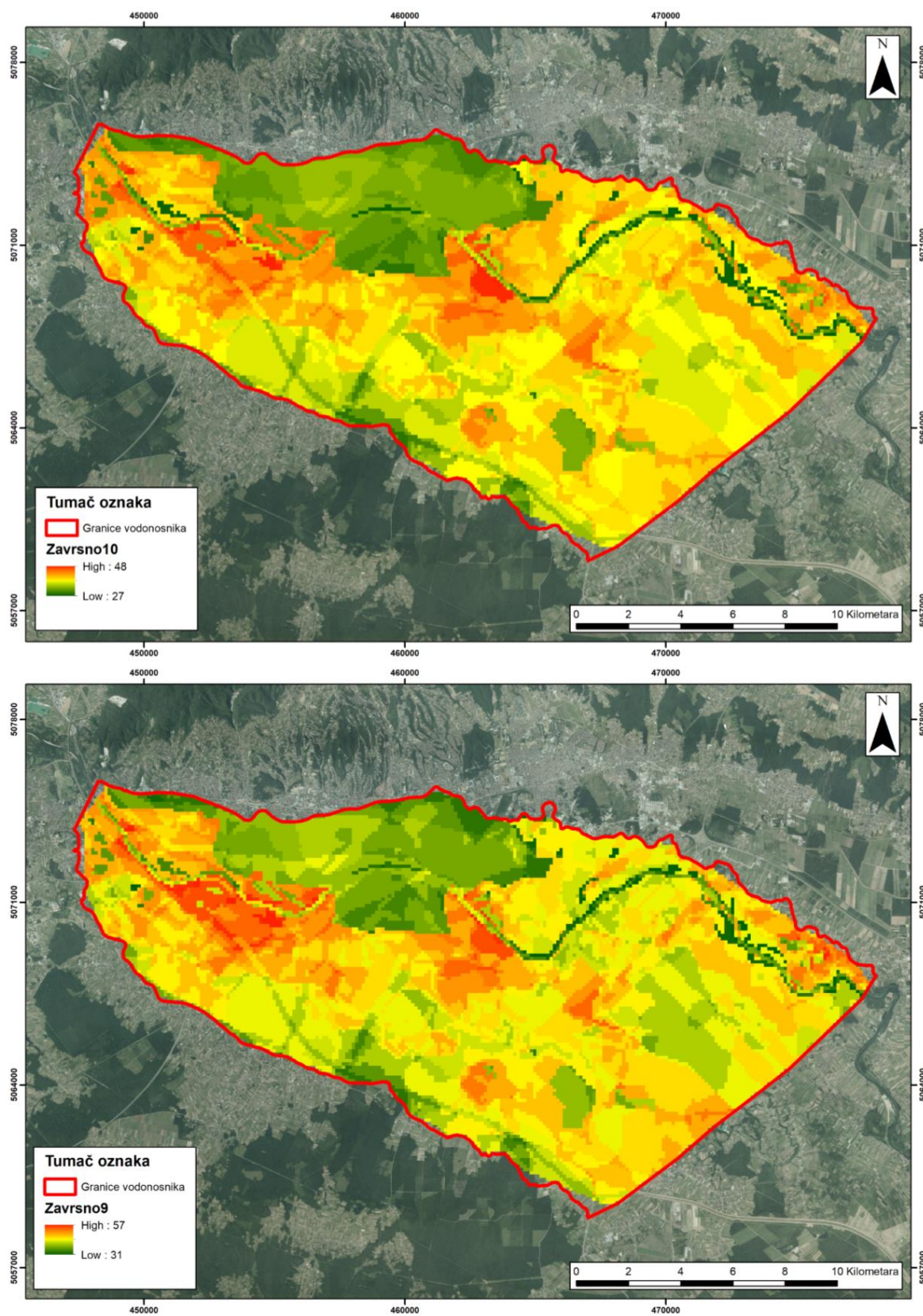


*Prilog 5. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama VII i VIII*



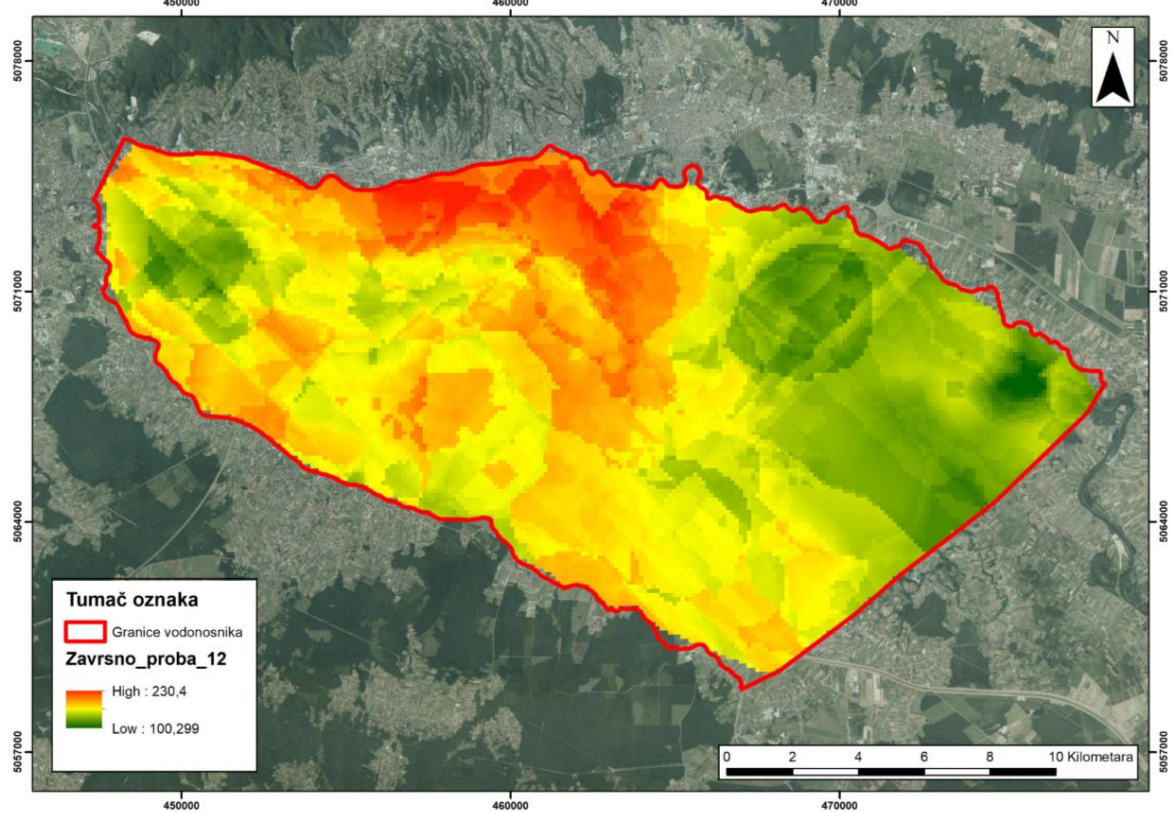
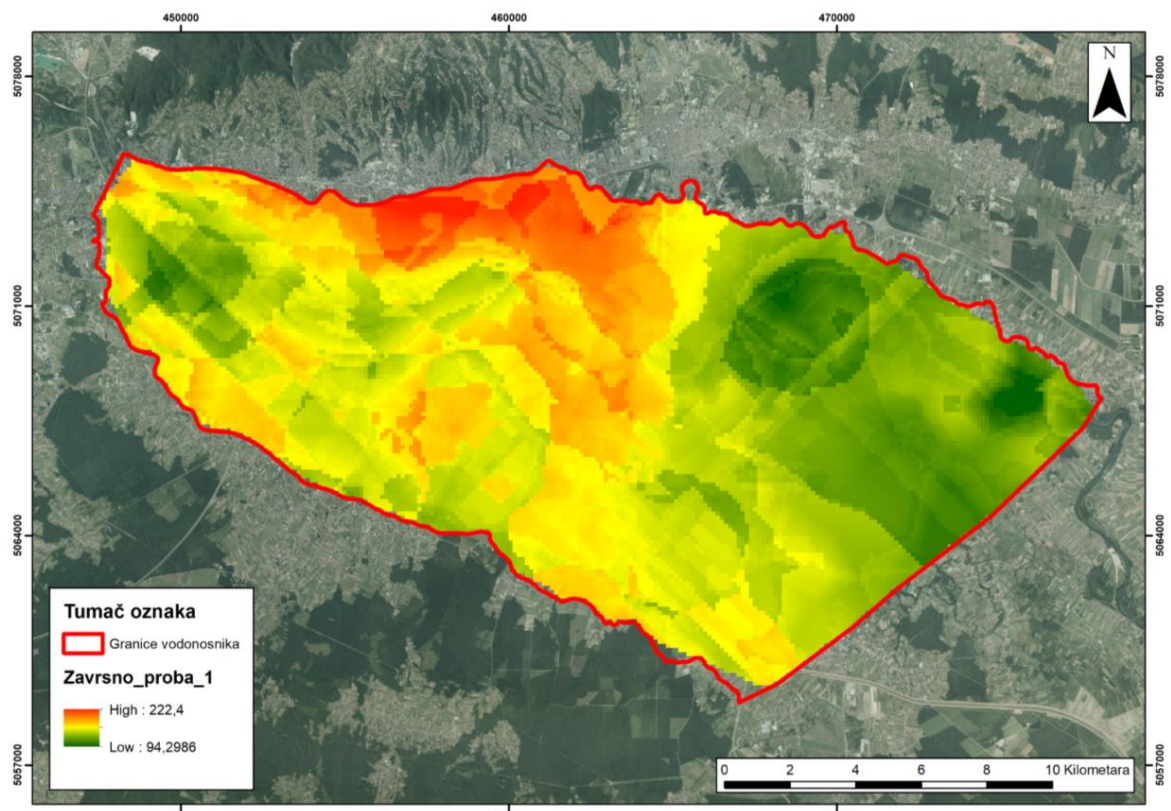


*Prilog 6. Prikaz karata indeksa ranjivosti obzirom na iteracije IX i X*



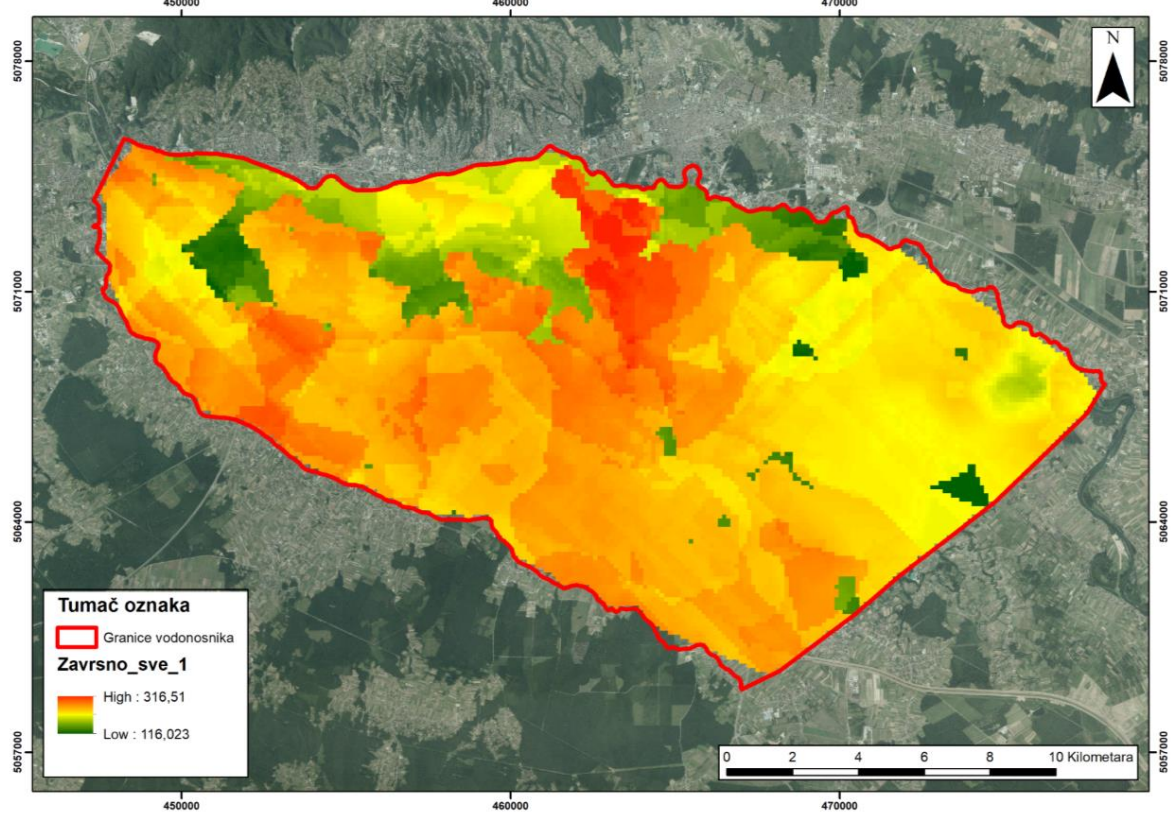
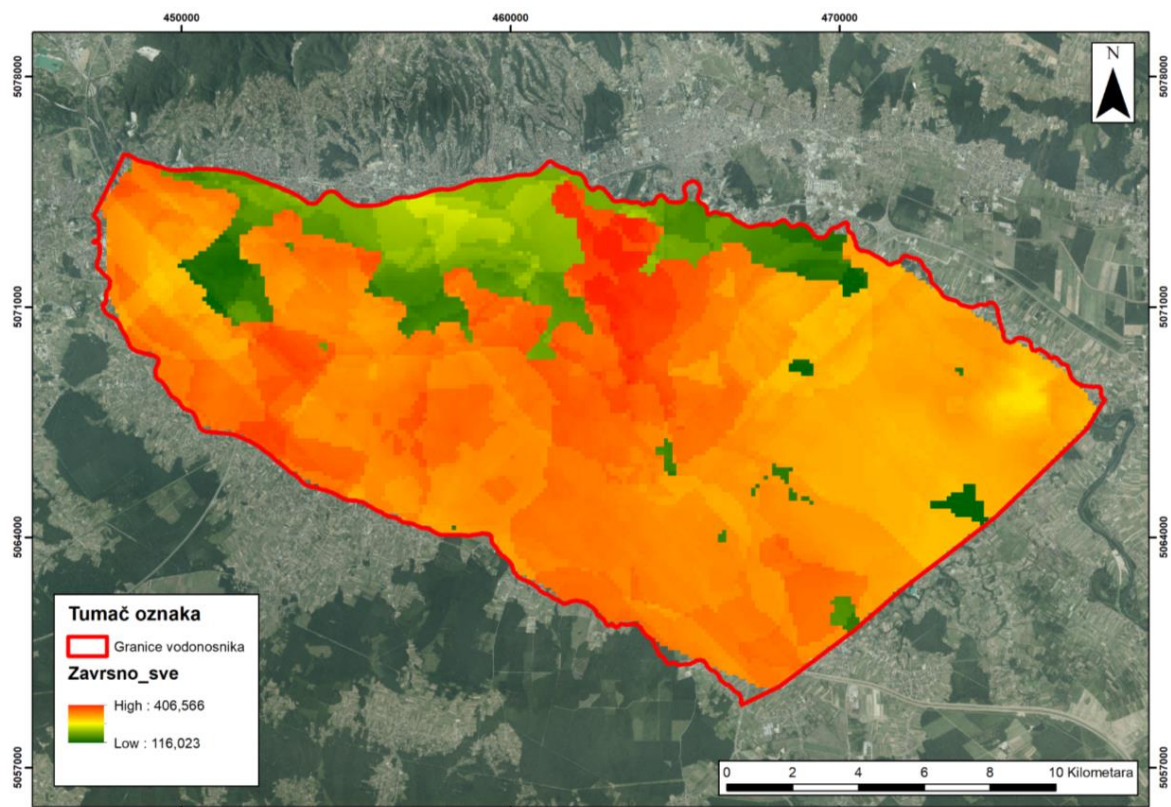


*Prilog 7. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama XI i XIV*



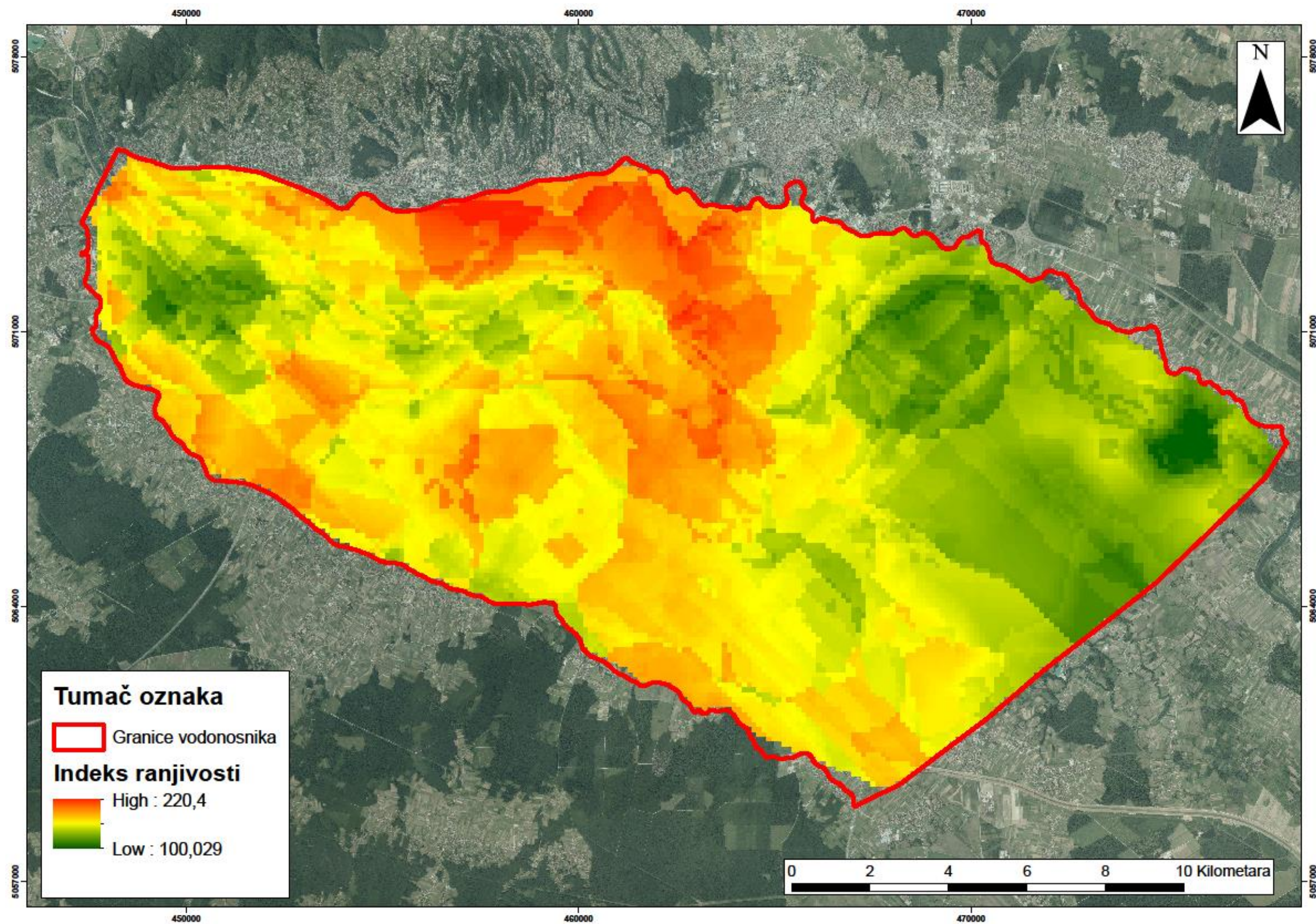


*Prilog 8. Prikaz karata indeksa ranjivosti prema iteracijama XII i XIII*





Prilog 9. Prikaz raspodjele indeksa ranjivosti prema iteraciji XV i karta koja je uzeta za daljnju obradu





Prilog 10. Karta ranjivosti zagrebačkog vodonosnog sustava s obzirom na dušikove spojeve

